



Rui Vidal Pereira

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

**Estudo da influência das tensões
residuais induzidas por *shot peening* na
vida à fadiga de molas de lâmina para a
indústria automóvel**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientadora: Rosa Miranda, Prof. Doutora, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Jorge Joaquim Pamies Teixeira
Arguente: Prof. Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos
Vogal: Prof. Doutora Rosa Maria Mendes Miranda



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2014

Rui Vidal Pereira

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

**Estudo da influência das tensões residuais induzidas
por *shot peening* na vida à fadiga de molas de lâmina
para a indústria automóvel**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa para a obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Setembro de 2014

Copyright

Estudo da influência das tensões residuais induzidas por *shot peening* na vida à fadiga de molas de lâmina para a indústria automóvel.

© Rui Vidal Pereira, FCT-UNL, 2014

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Aos meus pais e à memória do meu tio

Agradecimentos

A realização deste trabalho apenas foi possível graças ao contributo, empenho e apoio de várias pessoas às quais é imprescindível agradecer.

Desde já agradecer à minha orientadora, Professora Doutora Rosa Miranda e ao Engenheiro João Lopes por me terem dado a oportunidade de realizar este trabalho num ambiente industrial, na empresa Frauenthal Automotive – Azambuja.

À Professora Ana Sofia Matos por toda a ajuda e apoio prestado durante a fase de tratamento dos dados recolhidos.

Ao Engenheiro Luís Matias pela disponibilidade e orientação dadas durante o meu percurso bem como pela facilitação ao meu processo de integração nas estruturas da empresa, e ainda pela amizade manifestada.

Ao Engenheiro Carlos Marques e aos Senhores João Carlos e Alfredo Amaral assim como a todos os colaboradores do Departamento de Qualidade a supervisão, aprendizagem, companheirismo e apoio incondicional até nos momentos mais caricatos e peripécias que tornaram este trabalho num momento marcante da minha vida.

Ao Engenheiro Ludgero Santos e ao Senhor Ruben Soares assim como a todos os colaboradores do Departamento de Manutenção, pelo apoio fundamental durante os ensaios, pelos ensinamentos acerca dos equipamentos utilizados e esclarecimentos de dúvidas.

Ao Engenheiro Arménio Candeias e Senhor João Gaurim pela disponibilização do tempo necessário de produção para que os ensaios fossem realizados assim como por todo o apoio prestado.

Aos meus colegas e amigos, um muito obrigado pela ajuda e força demonstrada no decorrer do percurso académico. Um especial abraço para os meus amigos Guilherme Viegas, André Luso, Francisco Portugal, André Monteiro, João Pedro Leão, Tiago Marques, Pedro Pires, João Rui Duarte, David Henriques, Nuno Tomás, Rui Martins, David Nunes, Júlio Balagões, Paulo Palma Reis, José Guerreiro, Francisco Ramalho, Joana Ferreira e Nuno Delgado.

A todos, um sincero obrigado.

Resumo

A vida à fadiga de um componente submetido a variações de tensão é determinante para o sucesso de um projecto. O *shot peening* é um tratamento superficial que visa introduzir tensões residuais de compressão, para aumentar a vida à fadiga de componentes sujeitos a esforços cíclicos. Este trabalho teve como principal objectivo analisar o efeito deste tratamento na resistência à fadiga de molas de lâmina para a indústria automóvel, medida através da intensidade de Almen. Numa primeira fase pretendeu-se estudar o efeito do processo de *shot peening* na vida à fadiga, e numa segunda fase, estudar o efeito dos principais parâmetros do processo. Verificou-se que para intensidades de Almen mais elevadas ocorrem defeitos superficiais do tipo de sobreposição (*overlap*) que diminuem a vida à fadiga. Assim, não existe benefício considerável em trabalhar com intensidades de Almen elevadas, pois existe um aumento da probabilidade de falha, recomendando-se o cumprimento da especificação actualmente em uso na empresa. A redução da variabilidade do processo só é possível com um investimento em novos equipamentos (turbinas de nova geração e dispositivos de controlo de caudal). No entanto é possível aumentar a produtividade e reduzir os custos associados ao processo com os equipamentos existentes, aumentando o caudal de alimentação das turbinas, a velocidade do transportador e diminuindo a velocidade das turbinas.

Abstract

The fatigue life of a component subjected to cyclic stress is crucial to the success of a project. The *shot peening* is a surface treatment that aims to introduce compressive residual stresses to increase the fatigue life of components subjected to cyclic stresses. This work had as main objective the study of the effect of this treatment on the fatigue resistance of leaf springs for automobile industry measured by Almen intensity. Initially, it was intended to study the effect of the *shot peening* process on fatigue life, and subsequently, to study the effect of the main process parameters. It was found that for higher Almen intensities occurs surface defects (overlap) which decrease the fatigue life. Thus, there is no considerable benefit in working with high Almen intensities because there is an increased likelihood of failure, it is recommended to comply with the specification currently in use in the company. Reducing process variability is only possible with an investment in new equipment (turbines of new generation and flow control devices). However it is possible to increase productivity and reduce costs associated with the process with existing equipment by increasing the feed rate of the turbines, conveyor speed and decreasing the speed of the turbines.

Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	iii
Abstract	v
Índice de Figuras	ix
Índice de tabelas	xi
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento do problema e motivação	1
1.2 Objectivos	2
1.3 Estrutura	2
2 As molas de lâmina na indústria automóvel.....	3
2.1 Molas de lâmina	3
2.1.1 Definição	3
2.1.2 Material	4
2.2 Processos de fabricação.....	5
2.2.1 Preparação da matéria-prima.....	6
2.2.2 Conformação mecânica	6
2.2.3 Tratamento térmico	7
2.2.4 Tratamento superficial.....	8
2.3 <i>Shot peening</i>	9
2.3.1 Definição	9
2.3.2 Controlo do processo.....	11
2.3.3 Optimização dos parâmetros de processo	16
2.4 Tensões residuais	18
2.4.1 Definição	18
2.4.2 Métodos de determinação de tensões residuais	20
2.5 Resistência à Fadiga	22
2.5.1 Formação e propagação de fissuras por fadiga.....	22
2.5.2 Parâmetros que afectam o comportamento à fadiga.....	23
2.5.3 Ensaios de fadiga e análise estatística de resultados	24
2.6 Conclusões	26
3 Procedimento experimental.....	27
3.1 Introdução	27
3.2 Ensaios preliminares	27
3.3 Primeira fase.....	28

3.3.1 Caracterização do material	28
3.3.1 <i>Shot peening</i>	28
3.3.2 Ensaio de fadiga.....	30
3.3.3 Análise de tensões residuais	31
3.3.4 Análise metalográfica.....	32
3.3.5 Medição de durezas	33
3.4 Segunda fase – Métodos de Taguchi.....	34
4 Resultados e discussão	37
4.1 – Análise granulométrica da granalha e correlação com a intensidade de Almen nos equipamentos.....	37
4.1 Primeira fase.....	41
4.1.1 <i>Shot peening</i>	41
4.1.2 Análise metalográfica.....	42
4.1.3 Análise de durezas.....	43
4.1.4 Ensaio de fadiga.....	44
4.1.5 Análise de tensões residuais	47
4.2 Segunda fase.....	49
4.2.1 Intensidade de Almen.....	49
4.2.2 Rugosidade	51
4.2.3 Saturação	52
5 Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	55
5.1 Conclusões	55
5.2 Desenvolvimentos futuros.....	56
Bibliografia	57

Índice de Figuras

Figura 1 - Exemplo de aplicação de molas de lâmina (a) Barra estabilizadora (b) [1].	3
Figura 2 - Exemplo de mola trapezoidal (a) e parabólica (b) [3].	4
Figura 3 - Barras de material recebido da siderurgia	6
Figura 4 - Exemplo de perfil parabólico de laminação	6
Figura 5 - Processo de laminação de lâminas parabólicas	7
Figura 6 - Processo de têmpera de lâminas parabólicas	8
Figura 7 - Preparação da lâmina para <i>Stress-Peening</i>	8
Figura 8 - Pré-carga aplicada na fase final de produção	9
Figura 9 - Granalha de aço utilizada em <i>shot peening</i> [4].	9
Figura 10 - Tensões residuais de compressão geradas no processo de <i>shot peening</i> [5]	9
Figura 11 - Distribuição de tensões residuais em <i>shot peening</i> [7].	10
Figura 12 - Obtenção de tensões residuais por <i>shot peening</i> : a) distribuição de tensões inicial; b) distribuição de tensões no <i>shot peening</i> ; c) distribuição de tensões resultante [6].	11
Figura 13 – Forma da granalha utilizada em <i>shot peening</i> na indústria automóvel [4].	12
Figura 14 – Mecanismo de fractura da granalha [9]	12
Figura 15 – Comparação da duração da granalha convencional face à sujeita ao processo de revenido [10]	13
Figura 16 – Evolução da forma da granalha face ao seu desgaste [11].	13
Figura 17 – Dureza da granalha face ao desgaste da granalha [11].	14
Figura 18 - Equipamento de Almen [5]	14
Figura 19 - Curvas de saturação B, C, D [5]	15
Figura 20 - Curvas de saturação com diferentes intensidades [13]	15
Figura 21 – Gráficos de resposta para os diferentes parâmetros de <i>shot peening</i> [16].	18
Figura 22 – Esquema da técnica por difracção utilizando Raio-X [18]	22
Figura 23 - Representação esquemática da superfície de fractura de um aço [6].	23
Figura 24 - Execução do teste de Almen: a) chapas de Almen; b) Bloco padrão; c) Equipamento de <i>shot peening</i> ; d) Relógio comparador.	29
Figura 25 - Esquema do ensaio de fadiga.	30
Figura 26 - Máquina de ensaios de fadiga utilizada	30
Figura 27 - Amostras enviadas para análise	31
Figura 28 - Localização da amostra sujeita a análise de tensões residuais	31
Figura 29 - Serrote de corte mecânico	32
Figura 30 - (a) amostras recolhidas de material; (b) representação do corte efectuado	33
Figura 31 – Amostras após montagem e polimento	33
Figura 32 – Zonas de medição de durezas	33

Figura 33 – Desgaste granulométrico na máquina 623	37
Figura 34 – Desgaste granulométrico na máquina 624	38
Figura 35 – Intensidade Almen na máquina 623.....	38
Figura 36 – Intensidade Almen na máquina 624.....	39
Figura 37 – Curva de saturação na máquina 623	39
Figura 38 – Curva de saturação na máquina 624	40
Figura 39 – Impressão obtida no teste do ponto Quente	41
Figura 40 - Resultado do ponto quente na máquina 622 (Turbina 1).....	42
Figura 41 – Descarburização à superfície para cada grupo de molas testado	42
Figura 42 – Defeitos de sobreposição (overlap) para cada grupo de molas testado.....	43
Figura 43 – Defeito e zona de início de fractura (mola C3).....	45
Figura 44 - Vida à fadiga vs Intensidade Almen para as diferentes condições de ensaio	46
Figura 45 – Resultado gráfico para os diferentes factores – Intensidade de Almen	50
Figura 46 – Resultado gráfico para os diferentes factores - Rugosidade	52
Figura 47 – Resultado gráfico para os diferentes factores - Saturação	53

Índice de tabelas

Tabela 1 - Composição química do aço 51CrV4	5
Tabela 2 - Principais características mecânicas do aço 51CrV4	5
Tabela 3 – Níveis dos parâmetros de processo.....	17
Tabela 4 – Mecanismos básicos de geração de tensões residuais em diferentes processos de fabricação [6].	20
Tabela 5 – Parâmetros de processo para a produção das amostras	28
Tabela 6 – Características da máquina de <i>shot peening</i> (Máquina 622)	29
Tabela 7 – Parâmetros para ensaios de medição das tensões residuais	32
Tabela 8 – Variáveis independentes (factores) em estudo	34
Tabela 9 – Intensidade de Almen obtida para cada grupo de molas testado	41
Tabela 10 – Resultados dos ensaios de dureza para as várias amostras	44
Tabela 11 – Número de ciclos à fadiga	44
Tabela 12 – Localização e espessura de laminagem na zona de fractura.....	45
Tabela 13 – Numero médio de ciclos à fadiga	46
Tabela 14 – Resultados dos ensaios de tensões residuais para as diferentes condições de ensaio	47
Tabela 15 – Tensão à superfície	48
Tabela 16 – Tensão compressiva máxima.....	48
Tabela 17 – Tensão residual a 400 µm.....	49
Tabela 18 – Resultados obtidos para a intensidade de Almen para cada condição de ensaio.....	50
Tabela 19 – ANOVA Intensidade Almen	51
Tabela 20 - Resultados obtidos para a rugosidade para cada condição de ensaio.....	51
Tabela 21 – ANOVA Rugosidade.....	52
Tabela 22 - Resultados obtidos para a saturação para cada condição de ensaio	53
Tabela 23 – ANOVA Saturação.....	54

1 Introdução

1.1 Enquadramento do problema e motivação

A vida à fadiga de um componente submetido a variações de tensão, é determinante para o sucesso de um projecto.

Na indústria automóvel, mais especificamente, no projecto e construção de molas de lâmina, passou-se de pesados conjuntos de lâminas, habitualmente chamadas de trapezoidais para conjuntos mais leves, parabólicos. A redução do peso no caso das molas de lâmina está directamente associada ao aumento do nível das tensões de serviço, principalmente devido à redução da espessura. Com níveis de tensão de serviço cada vez mais altos, a durabilidade das peças envolvidas torna-se cada vez mais crítica, tornando necessária a existência de processos que compensem este aumento de tensões, mantendo constantes os níveis de vida à fadiga do componente.

O processo de *shot peening* é uma das principais etapas no processo de produção de componentes, sujeitos a esforços cíclicos e é um tratamento superficial que visa introduzir tensões residuais de compressão com vista ao aumento da vida à fadiga.

Durante muitos anos o processo de *shot peening* foi considerado com o objectivo único de introduzir tensões residuais de compressão à superfície, sendo os parâmetros seleccionados, de forma a atingir níveis máximos de profundidade e intensidade. A complexidade envolvida na optimização dos parâmetros de processo fazem com que ainda hoje seja feita empiricamente, sem grande base científica sobre os potenciais efeitos negativos que alguns dos parâmetros do processo possam ter na qualidade dos produtos produzidos.

1.2 Objectivos

A presente dissertação, desenvolvida na empresa de produção de molas de lâmina Frauenthal Automotive-Azambuja SA, no âmbito de um protocolo de colaboração com a FCT-UNL, teve como principal objectivo analisar o efeito do tratamento superficial de granalhagem (*shot peening*) na resistência à fadiga das molas de lâmina, medida através da intensidade de Almen.

Numa primeira fase pretendeu-se estudar o efeito do processo de *shot peening* com intensidades de Almen elevadas e numa segunda fase estudar o efeito individual dos principais parâmetros que influenciam o processo e que foram:

- a dimensão da granalha;
- a velocidade da turbina;
- a velocidade do tapete (tempo de exposição);
- o caudal de alimentação.

Pretendeu-se deste modo contribuir para a optimização do processo de tratamento superficial em molas de lâmina para a indústria automóvel.

1.3 Estrutura

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos. O primeiro é de carácter introdutório, onde são expostos os objectivos, o enquadramento e a motivação para o trabalho.

No segundo capítulo é feito um enquadramento do processo de *shot peening* na fabricação de molas de lâmina na indústria automóvel, apresentando-se as mais recentes contribuições na área, relevantes para esta dissertação.

No terceiro capítulo descreve-se e justifica-se o procedimento experimental adoptado e os ensaios realizados. É ainda apresentada uma caracterização do material base, bem como a descrição do equipamento e ferramentas utilizadas.

No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios realizados nas diferentes fases do trabalho desenvolvido.

No quinto e último, capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho realizado.

2 As molas de lâmina na indústria automóvel

Neste capítulo descrevem-se as molas de lâmina, os processos de fabrico enfatizando os processos de tratamento de superfície que visam o aumento da vida à fadiga, a partir da indução de tensões residuais de compressão à superfície.

2.1 Molas de lâmina

2.1.1 Definição

A suspensão de um automóvel é o elo de ligação entre a estrutura do veículo (chassi) e as rodas, sendo consequentemente, responsável pela absorção das vibrações ocasionadas por irregularidades (no pavimento por exemplo), tornando a condução de um veículo mais segura e confortável.

Os principais constituintes de um sistema de suspensão são as molas, os amortecedores e as barras estabilizadoras (Figura 1). Por definição, a mola suporta o peso do veículo e absorve a energia introduzida pelas irregularidades do piso, sendo que o amortecedor tem como função dissipar a energia acumulada pela mesma. Por outro lado, a barra estabilizadora tem a função de estabilizar o veículo, principalmente durante as curvas, ou seja, ela fornece a sustentação durante o rolamento [1].

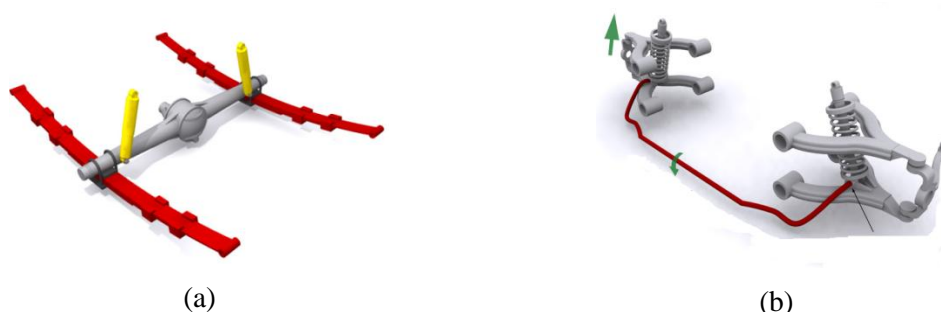


Figura 1 - Exemplo de aplicação de molas de lâmina (a) Barra estabilizadora (b) [1].

Existem quatro tipos de molas aplicados na indústria automóvel: helicoidal, lâmina, de torção e pneumáticas. As molas helicoidais, por serem mais pequenas, mais leves e imprimirem um melhor conforto, são habitualmente utilizadas em veículos leves. As molas de torção são habitualmente utilizadas quando existe falta de espaço para a instalação das helicoidais, e apresentam um menor conforto. Já as pneumáticas recentemente desenvolvidas, são maiores e mais caras, mas apresentam maior conforto devido à existência de um compressor que ajusta a pressão de ar [1].

As molas de lâmina, por sua vez mais pesadas, apresentam maior resistência e são utilizadas em veículos pesados, devido a exercerem também uma função estrutural. De notar que diversas simulações numéricas demonstram que as molas de lâmina produzem menor vibração (causada pelo movimento do veículo) em comparação com as helicoidais [2].

As molas de lâmina alvo deste estudo (Figura 2) são classificadas em 2 tipos: trapezoidal e parabólica. As trapezoidais têm uma espessura constante, enquanto nas parabólicas a espessura é variável.



Figura 2 - Exemplo de mola trapezoidal (a) e parabólica (b) [3].

As lâminas podem ser montadas em conjunto, ou individualmente (monolâmina). A grande diferença entre as duas está na distribuição das tensões ao longo do comprimento das lâminas, que para as parabólicas é constante, apresentando deste modo um menor peso quando comparadas com as trapezoidais para a mesma tensão de serviço.

2.1.2 Material

As molas de lâmina são usualmente sujeitas a condições de serviço extremamente severas, quer pelas cargas e tipos de esforços que irão suportar, quer devido às temperaturas, meios corrosivos e de vibração a que podem estar sujeitas. A fabricação de molas de lâmina exige cuidados excepcionais na fase de projecto e nos materiais utilizados.

Os aços de mola utilizados na fabricação das molas de lâmina apresentam alto limite de elasticidade, grande resistência e alto limite de fadiga. De qualquer modo, a escolha do material depende das propriedades desejadas, das aplicações, do custo e da técnica de fabricação. Os aços-carbono, com teor de carbono variando de 0,50% a 1,20%, satisfazem quase que completamente os requisitos das molas, de modo que a maioria destas, é feita com este tipo de aço. No entanto existem aplicações que exigem aços-liga como por exemplo o aço 51CrV4 conforme a norma DIN 59145, sendo a composição química apresentada na tabela 1. As principais características mecânicas, resultantes do ensaio de tracção são apresentadas na tabela 2.

Tabela 1 - Composição química do aço 51CrV4

Composição Química	C	Mn	Si	P	S
%	0,510	1,030	0,280	0,011	0,003
	Cr	Ni	Mo	V	Cu
	1,120	0,100	0,023	0,140	0,230

Tabela 2 - Principais características mecânicas do aço 51CrV4

Tensão de Rotura (MPa)	1575
Tensão de Cedência (Mpa)	1470
Alongamento de rotura (%)	10,4
Redução de área (%)	40

2.2 Processos de fabricação

Para conferir as propriedades elásticas necessárias às molas de lâmina, e devido às elevadas solicitações que este componente sofre durante o uso, todo o processo de fabricação deve garantir alta tensão limite de elasticidade e de resistência.

Regra geral, os processos de fabrico (ex. fundição, maquinagem, laminagem) e os tratamentos térmicos (ex. têmpera, revenido) introduzem tensões residuais no componente produzido. A presença de tensões residuais nas peças modifica o seu comportamento mecânico, podendo alterar a resistência mecânica, a tenacidade, a resistência à fadiga ou a aptidão a operar em condições de corrosão sob tensão. A existência de tensões residuais nas peças pode ter efeitos favoráveis ou prejudiciais caso contrariem ou favoreçam as solicitações a que estas irão estar sujeitas em serviço respectivamente, aumentando ou diminuindo o seu desempenho.

Todas estas considerações revelam a importância que tem o processo de fabrico para o desempenho das molas de lâmina. O processo de fabricação de molas de lâmina da Frauenthal Automotive – Azambuja pode ser dividido em quatro etapas distintas:

- preparação da matéria-prima;
- conformação mecânica;
- tratamento térmico;
- tratamento superficial.

2.2.1 Preparação da matéria-prima

O material é recebido vindo da siderurgia na forma de barras planas (Figura 3), com uma estrutura constituída por perlite mais ferrite, bruta de laminagem a quente, sendo o arrefecimento após laminagem feito ao ar.

Após as inspeções de recepção (análise de microestrutura, tamanho de grão, avaliação da descarboratação, dureza), o material é cortado com o comprimento necessário para as etapas de fabricação seguintes.



Figura 3 - Barras de material recebido da siderurgia

2.2.2 Conformação mecânica

Com o material já no comprimento pré-definido, a lâmina é laminada a quente (~1000°C), uma extremidade de cada vez, de modo a formar o perfil desejado (Figura 5). Dependendo do tipo de mola a produzir (Figura 4), o perfil laminado é parabólico (com espessura variável ao longo do comprimento) ou convencional (espessura constante).

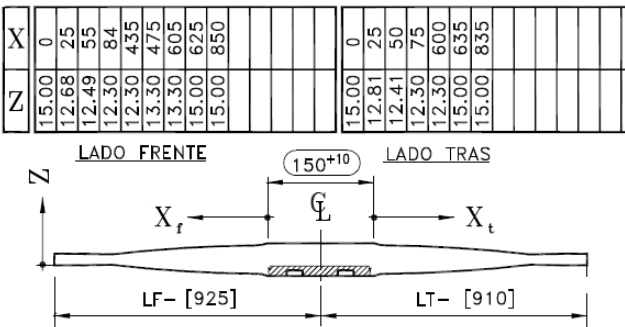


Figura 4 - Exemplo de perfil parabólico de laminação

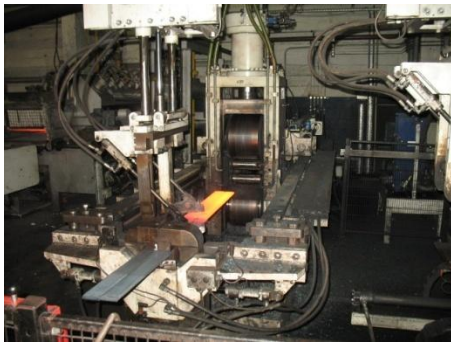


Figura 5 - Processo de laminação de lâminas parabólicas

Após a laminagem, a lâmina segue para os processos de forjamento a quente, onde são enrolados os olhais nas extremidades e ao corte por arrombamento de furos e ressaltos, dependendo do projecto da mola.

A deformação plástica a quente tira partido da diminuição de resistência mecânica do aço e do aumento de ductilidade que este apresenta quando se aumenta a temperatura de trabalho. A capacidade de um material deformar em regime plástico é acrescida, podendo a operação ser realizada com menor força e potência disponível. O trabalho a quente reduz substancialmente a ocorrência de problemas de fractura que poderiam ocorrer se a mesma operação fosse realizada a frio.

As principais desvantagens do trabalho a quente estão associadas ao elevado consumo energético, ao fraco controlo dimensional (devido aos ciclos térmicos de aquecimento-arrefecimento), e ainda à formação de camadas superficiais de óxidos nas peças. Este último aspecto acaba, quase sempre, por exigir a utilização de operações posteriores de acabamento para as peças fabricadas.

2.2.3 Tratamento térmico

Os tratamentos térmicos, como recozimento, têmpera, revenido e normalização, modificam a estrutura metalúrgica do material, através da alteração do tamanho de grão, da transformação de fases e têm por finalidade melhorar as características iniciais dos materiais.

Após os processos de laminagem e forjagem, o material apresenta uma estrutura basicamente de perlite mais ferrite, bruta de laminagem e bastante heterogénea, como tal e com o objectivo de aumentar a resistência do material, as molas passam ao processo de têmpera ($\sim 900^{\circ}\text{C}$) em óleo ($\sim 70^{\circ}\text{C}$), passando posteriormente por um processo de revenido à temperatura de 400°C durante 3 horas.

No caso concreto do tratamento térmico por têmpera (Figura 6) originam-se transformações de fases, das quais resultam estruturas bainíticas ou martensíticas, sendo esta última fundamental no caso das molas de lâmina, na medida em que corresponde ao nível

máximo de dureza que um material pode adquirir por tratamento térmico, elevando assim a sua resistência.



Figura 6 - Processo de têmpera de lâminas parabólicas

2.2.4 Tratamento superficial

Após o tratamento térmico, segue-se o tratamento superficial, que visa introduzir tensões residuais de compressão na superfície das molas de lâmina para aumentar a vida à fadiga. Deste modo, a introdução à superfície de tensões residuais de compressão, traduz-se na diminuição da componente de tracção da tensão alternada, pelo que a sua presença resulta num aumento da resistência à fadiga.

Este efeito benéfico é atingido na indústria através do processo de *stress peening* (Figura 7) que consiste num processo de *shot peening* no qual a mola é pré-tensionada de modo a amplificar as tensões residuais de compressão na superfície, devido ao facto de a pré-tensão se adicionar às tensões induzidas pelo *shot peening*. Contribuindo de forma positiva para o desempenho da vida em serviço do componente, inibindo-se a iniciação e propagação de fissuras.



Figura 7 - Preparação da lâmina para *Stress-Peening*

Após o processo de *stress peening*, o material segue para a montagem de acessórios, e pintura, tendo como finalidade protegê-lo contra a corrosão atmosférica durante o uso. A última etapa do processo de fabricação é a pré-carga (Figura 8). Durante esta operação, a mola é

colocada numa prensa, onde a sua altura final é corrigida através de uma carga aplicada acima do limite de escoamento do material. Além da definição da altura final da mola, esta etapa do processo é importante, pois é gerada uma leve sobrecarga, que por sua vez induz tensões residuais de compressão no lado de tração das molas, contribuindo para o retardamento da nucleação e propagação de fissuras de fadiga.



Figura 8 - Pré-carga aplicada na fase final de produção

2.3 Shot peening

2.3.1 Definição

O processo de *shot peening* caracteriza-se por ser um processo de trabalho a frio no qual a superfície do componente a tratar é atingida com pequenas partículas de granalha (Figura 9).



Figura 9 - Granalha de aço utilizada em *shot peening*[4]

Cada partícula ao chocar com a superfície do material vai agir como um pequeno martelo, produzindo uma pequena deformação, que vai encruar a superfície do componente, promovendo assim a formação de tensões residuais de compressão (Figura 10). Este impacto leva também ao aumento da tensão de escoamento (patamar de cedência), para além de alterações na rugosidade da peça tratada [5].

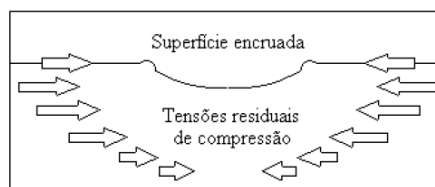


Figura 10 - Tensões residuais de compressão geradas no processo de *shot peening*[5]

A deformação plástica induzida pelo impacto das múltiplas partículas na superfície do componente introduz uma camada uniforme de tensões residuais de compressão, que leva a um aumento da vida à fadiga dos componentes [6].

O conhecimento do perfil de tensões residuais promovido pelo processo de *shot peening* é fundamental para a determinação dos efeitos positivos e negativos do processo.

A Figura 11 apresenta o perfil de tensões residuais em profundidade produzido pelo processo de *shot peening* numa mola de lâmina. Observa-se que as tensões residuais de compressão são limitadas a uma fina camada superficial e que as tensões residuais de tracção apesar de terem menor amplitude abrangem um maior volume de material.

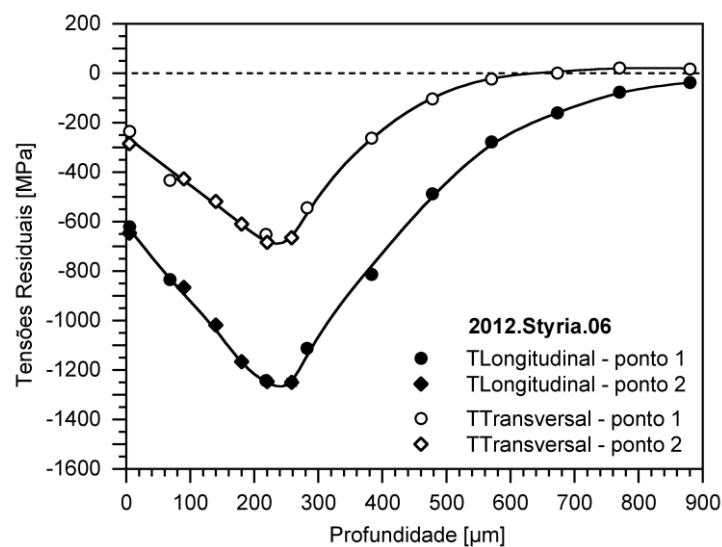


Figura 11 - Distribuição de tensões residuais em *shot peening* [7]

O processo de *shot peening* é um processo controlado, que tem como principal efeito a introdução de tensões residuais de compressão à superfície com o objectivo de aumentar a resistência à fadiga, sendo o processo fundamental para [6]:

- a redução das tensões de tracção na superfície em serviço;
- a inibição à iniciação e propagação de fissuras por fadiga;
- o aumento da resistência à iniciação de fissuras por corrosão sob tensão;
- a eliminação de distorções originadas por tratamentos térmicos.

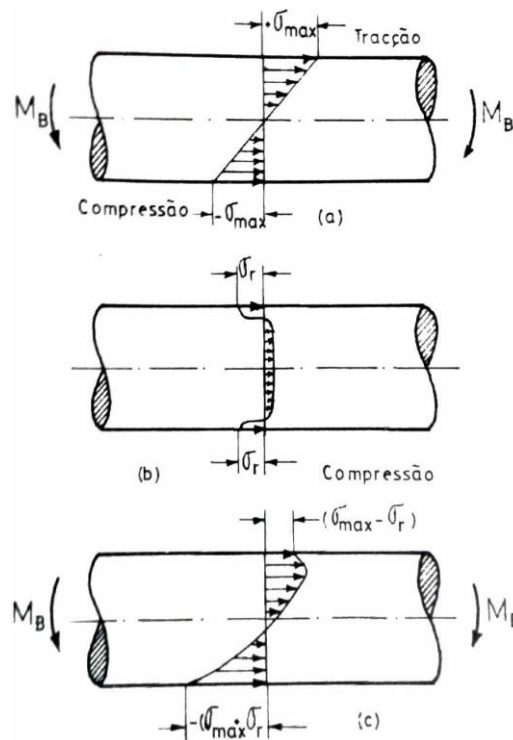


Figura 12 - Obtenção de tensões residuais por *shot peening*: a) distribuição de tensões inicial; b) distribuição de tensões no *shot peening*; c) distribuição de tensões resultante [6]

2.3.2 Controlo do processo

Os principais parâmetros que influenciam o processo de *shot peening* são [8]:

- a granalha (dimensão e tipo de material);
- a velocidade de projecção;
- o caudal de alimentação;
- o tempo de exposição;
- o material alvo.

De entre estes, a granalha é o factor mais crítico. Se a escolha da granalha não for apropriada, todos os outros parâmetros serão difíceis de controlar de modo a garantir uma boa resistência à fadiga [9].

A granalha caracteriza-se pelo seu tamanho, forma, dureza, densidade, durabilidade e material.

O tamanho da granalha é o parâmetro mais controlado na indústria. Quanto maior for a granalha maior será a sua massa, o que leva a uma maior intensidade do processo (energia cinética). Usualmente o tamanho é avaliado através do teste granulométrico que consiste na utilização de crivos de diferentes medidas.

O segundo parâmetro mais controlado é a forma da granalha pois é importante que a mesma seja o mais esférica possível. Na indústria automóvel e no caso das molas de lâmina, a granalha é fabricada através de arame que é cortado com a medida especificada. A granalha pode sofrer ainda um processo de arredondamento, apresentando 3 níveis (G1, G2 e G3) sendo que no último a granalha apresenta uma forma praticamente esférica.

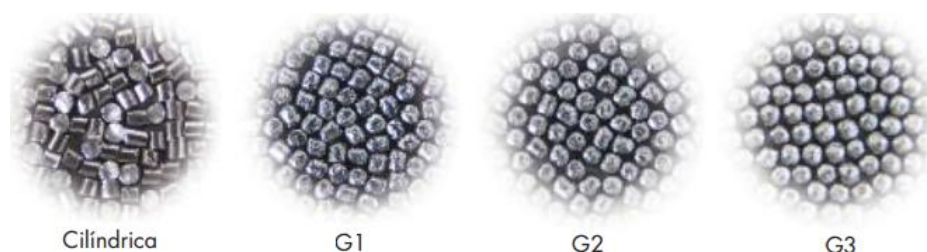


Figura 13 – Forma da granalha utilizada em *shot peening* na indústria automóvel [4].

A dureza da granalha deverá ser no mínimo igual à do componente sujeito ao processo, de modo a garantir tensões residuais de compressão (intensidade e profundidade).

A densidade é uma característica da granalha que raramente é avaliada. A medição da densidade é um método rápido e válido para avaliar a presença de porosidade e defeitos internos. A granalha que apresenta este tipo de defeitos tem baixa densidade e tendência para quebrar mais rapidamente, reduzindo o tamanho e aumentando a probabilidade de existência de arestas livres [9].

A durabilidade da granalha é uma das características mais importantes mas ao mesmo tempo a mais complexa. É definida como a capacidade que granalha tem de manter o seu tamanho e forma durante o uso. A vida útil da granalha é quantificada através do tempo, ou número de ciclos, que dura antes de atingir uma dimensão inadequada [9].

A durabilidade da granalha tem influência ao nível:

- da resistência à fadiga dos materiais alvo do processo;
- ambiental (produção e eliminação de poeiras);
- da manutenção dos equipamentos;
- dos custos da granalha em si.



Figura 14 – Mecanismo de fractura da granalha [9]

Para aumentar a durabilidade, segundo o investigador Uwe Kerschling, a granalha deverá ser sujeita a um processo de revenido, de modo a fomentar uma normalização da sua estrutura interna isto para que a ruptura da granalha não se deva à influência de tensões desfavoráveis [10].

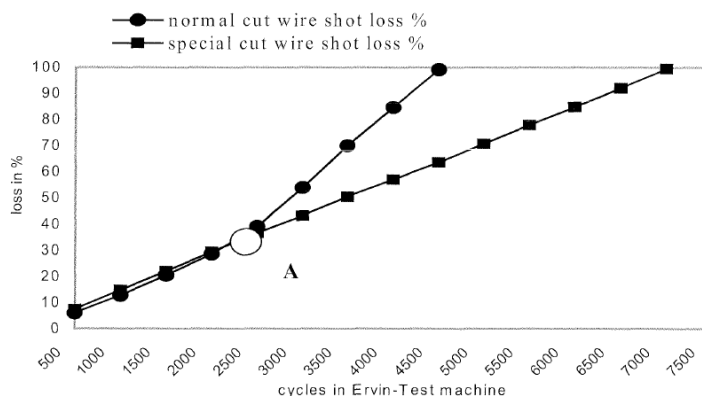


Figura 15 – Comparação da duração da granalha convencional face à sujeita ao processo de revenido [10]

A última característica da granalha com relevância, é o próprio material que pode ser aço, aço inoxidável, vidro ou cerâmico.

Para fabricação de molas de lâmina é utilizada granalha de aço, fabricada através de arame cortado do tipo G1, visto ser a que melhor se adequa ao material base e que apresenta o melhor compromisso entre custo, função e durabilidade. Este tipo de granalha tem tendência para passar de uma forma cilíndrica a esférica o que apresenta benefícios óbvios. De realçar também o facto de a granalha ter tendência a endurecer com o desgaste [11].

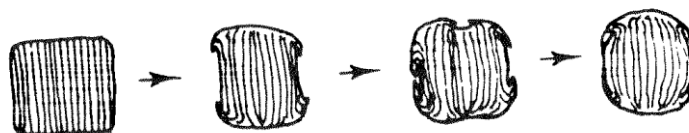


Figura 16 – Evolução da forma da granalha face ao seu desgaste [11].

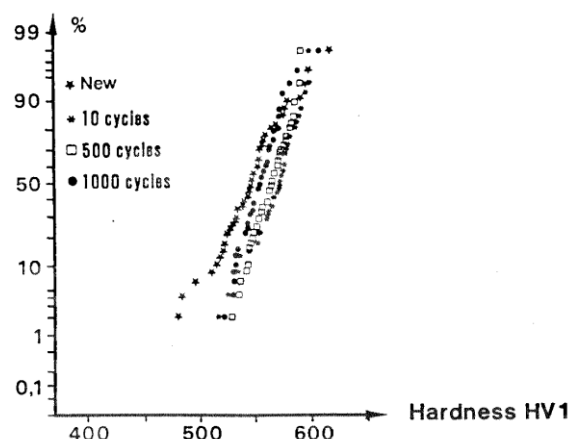


Figura 17 – Dureza da granalha face ao desgaste da granalha [11].

Na prática a eficácia e repetibilidade do processo de *shot peening* é normalmente assegurada na indústria automóvel usando dois parâmetros de controlo: a intensidade de Almen e a percentagem de superfície tratada ou cobertura.

A intensidade do processo é quantificada através do teste de Almen, introduzido por John Almen. O mesmo corresponde ao granalhamento de uma chapa (chapa de Almen) de material (SAE 1070) e dimensão padronizada. No teste, a chapa de Almen é presa a um bloco de aço e exposta a granalhagem num dos lados, durante um determinado tempo de exposição (Figura 18). Após retirar a chapa do suporte é medida a altura do arco produzido num relógio comparador de padrão. Esta medida é então relacionada com as tensões residuais compressivas induzidas durante o processo de *shot peening* [12].

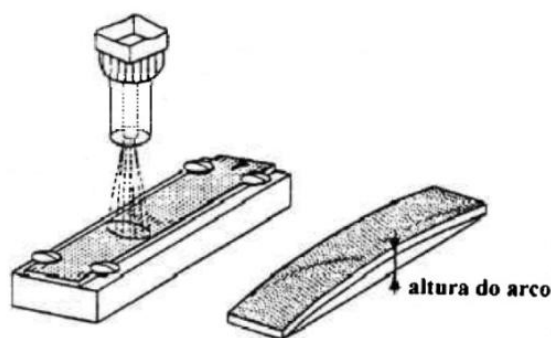


Figura 18 - Equipamento de Almen [5]

Para a determinação da intensidade de Almen é também necessário conhecer a curva de intensidade ou de saturação da chapa de Almen. Isso é feito a partir do levantamento de uma curva (Figura 19) a partir de várias chapas sujeitas a diferentes tempos de exposição, relacionando a altura do arco da chapa com o tempo de exposição. A saturação é definida como o primeiro ponto da curva, onde, dobrando o tempo de exposição, ocorre um acréscimo da altura do arco de menos de 10%. Este ponto designa-se por ponto de saturação [5].

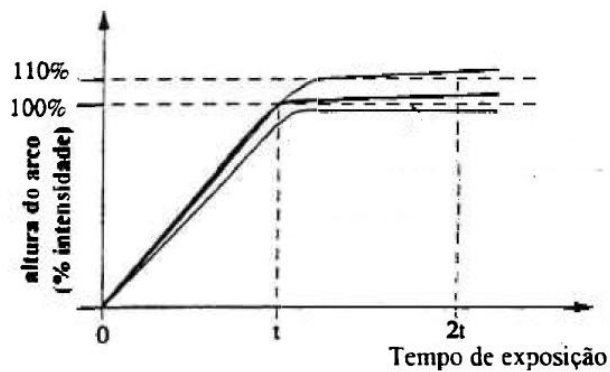


Figura 19 - Curvas de saturação B, C, D [5]

Se a intensidade correspondente ao ponto de saturação, obtida através da curva não estiver dentro da especificação pretendida, os parâmetros do processo deverão ser ajustados [13].

Por exemplo, um valor demasiado alto, pode ter sido devido a uma velocidade de impacto excessiva, ou granalha com dimensões exageradas (Figura 20), o que leva a um problema económico (mais recursos que o necessário) mas também de qualidade, devido à rugosidade introduzida na superfície que pode reduzir a vida à fadiga dos componentes. Pelo contrário, um valor demasiado baixo, pode ser devido a uma velocidade de impacto baixa, ou a granalha de dimensões reduzidas (Figura 20). Isto dificulta o cumprimento da especificação de intensidade, pelo que é necessário aumentar o tempo de exposição, diminuindo a produtividade, ou a quantidade de impactos, através da variação de caudal (mais desgaste do equipamento).

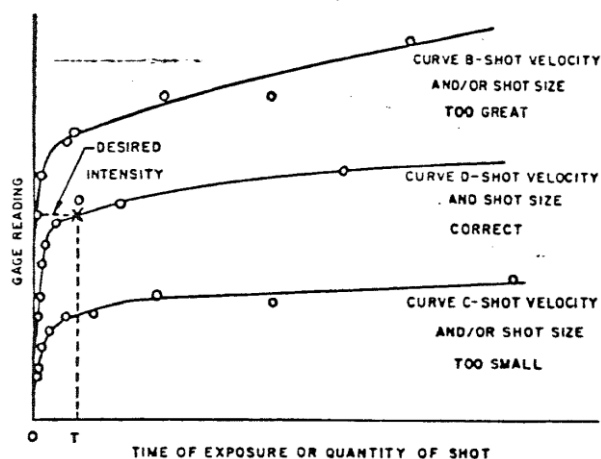


Figura 20 - Curvas de saturação com diferentes intensidades [13]

A cobertura é definida como a extensão, em percentagem da superfície da peça ou componente, que foi coberta pelos impactos no *shot peening*. Existe uma relação quantitativa entre a cobertura e o tempo de exposição, que pode ser expressa por [13]:

$$C_n = 1 - (1 - C_1)^n$$

Em que C_1 é a percentagem de cobertura após 1 ciclo (tempo de exposição necessário para atingir a saturação), C_n é a percentagem de cobertura após n ciclos, sendo n o número de ciclos.

No limite a cobertura aproxima-se de 100%, mas na prática é difícil obter valores de cobertura acima de 98%.

2.3.3 Optimização dos parâmetros de processo

Na indústria e devido à falta de informação existente iniciou-se um importante esforço de pesquisa acerca dos potenciais efeitos do processo de *shot peening* de modo a fornecer uma definição clara dos níveis óptimos e de tolerâncias a aplicar aos parâmetros de processo. A selecção adequada dos parâmetros de funcionamento, foi feita através do projecto de experiências (DOE – Design of Experiments), que permitiu a optimização do processo [14].

Genichi Taguchi desenvolveu uma metodologia para o desenvolvimento da qualidade baseada em conceitos estatísticos, especialmente no Desenho de Experiências (DOE) cujo objectivo é reduzir a variabilidade de um processo ou produto. A redução da variação é atingida quando se seleccionam os melhores níveis dos factores de controlo, que afectam de forma significativa a resposta, permitindo que o processo ou produto seja menos sensível à variação do ruído, ou seja, mais robusto.

Segundo Taguchi, “A Qualidade de um produto determina-se pela perda económica imposta à sociedade a partir do momento em que o produto está pronto para ser distribuído”. Para minimizar essa perda, Taguchi considera que é fundamental fabricar um produto que seja insensível (robusto) a todo e qualquer ruído provocado pelos factores não controláveis que afectam o desempenho do processo.

Para minimizar o efeito das fontes de ruído, Taguchi defende uma abordagem integrada para a concepção e desenvolvimento de produtos e processos robustos que envolve as fases de concepção do sistema, dos parâmetros e das tolerâncias.

O projecto por parâmetros é utilizado para aperfeiçoar a qualidade sem controlar ou eliminar as causas de variação. Controlar ou eliminar as causas pode se tornar dispendioso, em comparação com o conceito de projecto por parâmetros. Isto significa que certos parâmetros no projecto de produtos ou processos são estabelecidos para que o desempenho se torne menos sensível às causas de variação.

Taguchi considera três tipos de variáveis (factores) no planeamento das experiências. As que afectam a resposta (factores de controlo), as que afectam a média (factores de sinal) e as que não são controláveis mas também afectam a variação da resposta (factores de ruído);

O principal objectivo do planeamento de experiências de Taguchi passa por determinar os níveis dos factores controláveis (controlo e sinal) que tornam o produto robusto ou insensível ao ruído. Nos métodos de Taguchi os níveis baixo, médio e alto dos factores são habitualmente designados por 1, 2 e 3 quando os factores têm três níveis. Taguchi definiu matrizes ortogonais para o planeamento das experiências, designadas por L_N , onde N representa o número de experiências a realizar.

De destacar a identificação da característica da qualidade que pode ser feita numa escala mensurável ou por atributos. Considerando uma característica mensurável esta pode ser estática ou dinâmica, e pode ser medida numa escala contínua. As características mensuráveis estáticas podem ser do tipo: Nominal-é-melhor, Menor-é-melhor e Maior-é-melhor [15].

O método de Taguchi foi já utilizado com sucesso na optimização do processo de *shot peening* para o aço inoxidável AISI 304 utilizando *Grey relational analysis* (GRA), *Principal component analysis* (PCA) e o método de Taguchi [16].

Na análise realizada estudou-se a influência de 5 parâmetros de processo: pressão, tamanho da granalha, tempo de exposição, distância à peça e ângulo de ataque, tendo sido escolhidos os níveis apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Níveis dos parâmetros de processo.

Parâmetros de processo	L1	L2	L3
P - Pressão (MPa)	0,196	0,392	0,588
S - Tamanho granalha (mm)	0,85	1,00	1,85
T - Tempo de exposição (s)	80	120	160
D - Distância à peça (mm)	80	100	120
E - Ângulo de ataque	60°	75°	90°

Nesta análise foi utilizada uma matriz ortogonal L27, que garante uma comparação equilibrada entre os níveis de qualquer parâmetro, isto é, para três níveis de cada um dos cinco factores existem 27 experiências. As características de desempenho escolhidas foram a resistência à tracção, a dureza à superfície e a resistência à fadiga.

No entanto é sabido que com o método de Taguchi apenas uma única característica de desempenho é optimizada tendo Phadke et. al. sugerido que a optimização das características

múltiplas de desempenho se torna difícil com o método de Taguchi. Face ao exposto foi inicialmente proposto por Deng, utilizar *GRA*, de modo a avaliar o efeito dos parâmetros de *shot peening* quando se quer analisar características de resposta múltipla. Na Figura 21 apresentam-se os gráficos de resposta obtidos, nestes gráficos podem-se identificar facilmente quais são os parâmetros que mais influenciam o processo, sendo a combinação de parâmetros ótima P1, S2, T3, D1, E3.

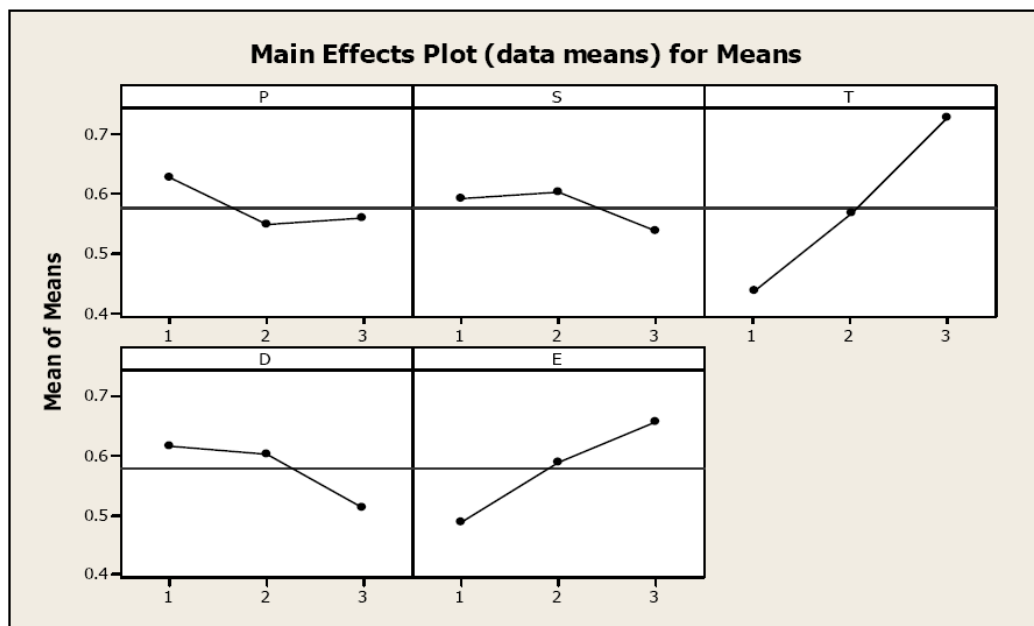


Figura 21 – Gráficos de resposta para os diferentes parâmetros de *shot peening* [16].

2.4 Tensões residuais

2.4.1 Definição

Designam-se por tensões residuais as tensões que se equilibram mutuamente (o somatório das forças e dos momentos é igual a zero) num dado volume de material não sujeito a constrangimento externo (nem térmico, nem mecânico), isto é, são aquelas que permanecem no componente após terem cessado as forças externas anteriormente aplicadas sobre o mesmo [6].

As tensões residuais surgem sempre que uma dada região de um material é deformada elástica ou plasticamente de modo não homogêneo fazendo surgir incompatibilidades do estado de deformação. As tensões residuais podem classificar-se em três grupos, de acordo com um esquema proposto por *Macherauch*:

Tensões residuais de 1ª ordem que são aproximadamente homogêneas ao longo de áreas relativamente extensas (vários grãos) e que estão em equilíbrio quando estendidas à globalidade do material; qualquer interferência no equilíbrio de forças e momentos de um elemento de

volume contendo tensões de 1ª ordem trará como consequência uma alteração das suas dimensões.

Tensões residuais de 2ª ordem que são aproximadamente homogêneas ao longo de um grão ou de parte de um grão e que estão em equilíbrio numa zona do material abrangendo vários grãos; só são detectáveis variações macroscópicas de dimensões de um elemento de volume contendo tensões residuais de 2ª ordem se ocorrerem várias destas perturbações elementares em diferentes regiões do material.

Tensões residuais de 3ª ordem que são heterogêneas quando analisadas numa área submicroscópica, ou seja, à escala de algumas distâncias interatómicas, estando em equilíbrio só ao longo de regiões muito reduzidas de um grão. Se houver uma rotura do equilíbrio deste tipo de tensões não será detectável nenhuma variação macroscópica de dimensões.

A natureza benéfica ou prejudicial das tensões residuais está relacionada com três factores:

- tipo de material, ou seja se ele encrua ou amacia perante deformação plástica cíclica;
- perfil de tensões residuais introduzido durante o processamento termo-mecânico e a redistribuição destas tensões na deformação cíclica;
- tipo de carregamento a que o material será submetido durante a sua utilização.

A classificação das tensões residuais acima apresentada pode ser posta em correspondência com a classificação mais habitual de macro e microtensões.

As tensões residuais microscópicas podem ser induzidas por tratamento térmico, como resultado de variações de volume produzidas por transformação de fase, reacções de precipitação ou por deformações térmicas existentes, por exemplo, entre uma partícula não metálica e a matriz metálica, durante o arrefecimento.

As tensões residuais macroscópicas podem ser introduzidas nos componentes durante a fabricação e como resultado da deformação plástica durante a utilização do equipamento. Estas tensões residuais de natureza macroscópica e de maior alcance quando comparadas com as microscópicas, podem ser introduzidas através de tensões originadas: por fundição, laminagem, extrusão, soldadura e *shot peening* (Tabela 4) [6].

Tabela 4 – Mecanismos básicos de geração de tensões residuais em diferentes processos de fabricação [6].

Origem da tensão residual	Processo de fabricação	Observações
Tensões originadas mecanicamente	Conformação	Laminagem; Forjamento; Estampagem
	Tratamentos de superfície	Shot peening; Rectificação; Lixamento
	Processos de maquinação	Torneamento; Fresagem; Mandrilamento; Furação
Tensões originadas em transformações de fase e microestrutura heterogénea	Tratamentos termoquímicos	Nitretação; Cementação; Carbo-Nitretação
	Tratamentos térmicos	Têmpera; revenido
	Deposição superficial	Metalização; Electrodeposição; Galvanização
	Processos de soldadura	Todos
Tensões originadas termicamente	Processos de maquinação	Aquecimento provocado por torneamento, fresagem, mandrilamento e furação
	Processos de soldadura	Todos
	Tratamentos térmicos	Têmpera; revenido; recozimento
	Tratamentos termoquímicos	Nitretação; Cementação; Carbo-Nitretação
	Processos de fundição	Arrefecimento heterogéneo no molde

2.4.2 Métodos de determinação de tensões residuais

A medição de tensões residuais é um passo fundamental no estudo dos processos de melhoria da resistência à fadiga das molas de lâmina, por todos os factores já apresentados nos capítulos anteriores. Esta medição é obrigatória, pois os fabricantes exigem normalmente um valor mínimo de tensão residual de compressão a uma determinada profundidade à saída do processo *de shot peening* sendo esta avaliação feita anualmente. De entre os vários métodos existentes (mecânicos e de difracção) existem: o método do furo e o método da difracção por Raios X [17].

O método do furo cego é um método semidestrutivo baseado na medida da deformação aliviada à superfície causada pela introdução de um furo, com diâmetro pequeno, na superfície do componente. Este método só pode ser aplicado quando o volume do material a remover não

seja prejudicial ao desempenho do componente, devendo ter-se em atenção também o modo como o furo é feito, de modo a minimizar as tensões que a abertura do furo possa introduzir. Como as tensões residuais não são completamente aliviadas na região do furo, não é possível calculá-las através da lei de Hooke, exigindo uma etapa de calibração experimental ou computacional [17].

No entanto, a técnica mais correcta e precisa para a medição de tensões residuais é a Difracção de Raios-X. Esta técnica permite determinar a distribuição de tensões residuais à superfície sem que haja remoção de material, não conseguindo no entanto ultrapassar uma profundidade de 100 microns. Como tal, e sabendo que é usualmente necessário atingir profundidades maiores, é removido material através do polimento electrolítico da superfície o que permite obter os perfis de tensões residuais para as profundidades pretendidas [18].

A técnica de difracção por Raio X é um método analítico não destrutivo. Quando um determinado material está submetido a tensões residuais, vão ocorrer deformações que levam à alteração dos valores dos parâmetros de rede da estrutura cristalina, sendo essas alterações possíveis de ser medidas através de difracção de Raio-X. Esta técnica só é válida para a medição de tensões em materiais elásticos, isotrópicos e homogéneos. As medições das deformações superficiais têm de ser realizadas em pequenas áreas e são mais demoradas do que as técnicas mecânicas (destrutivas) [18].

Através da lei de Bragg, e conhecido o comprimento de onda da medição (λ) e o ângulo entre o feixe incidente e o plano de átomos θ em análise, determina-se o espaçamento interplanar d . A existência de tensões residuais origina variações de extensão, ou seja de distância entre planos atómicos. Sabendo que no domínio elástico, as extensões são devidas a variações deste espaçamento podem calcular-se através da equação 2 [18].

$$\lambda = 2d \sin \theta \quad (1)$$

em que,

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d} = - \cot \theta \Delta \theta \quad (2)$$

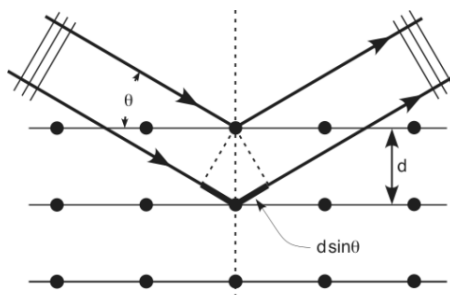


Figura 22 – Esquema da técnica por difração utilizando Raio-X [18]

2.5 Resistência à Fadiga

Quando um componente é sujeito a variações sucessivas de cargas e descargas (cíclicas ou variáveis), a rotura destes poderá ocorrer para valores de tensão abaixo do limite de resistência do material. Este tipo de carregamento mesmo solicitando o material com baixos valores de tensão leva a um fenómeno conhecido como fadiga.

A fadiga de um metal define-se de acordo com a ASTM como sendo:

“Um processo de alteração estrutural permanente, progressivo e localizado, que ocorre num material sujeito a condições que produzem tensões ou extensões dinâmicas num ponto ou em vários pontos, e que pode culminar em fendas ou numa fractura completa após um número suficiente de variações de carga ”.

A rotura por fadiga é a causa de 80 a 90% de todas as roturas de peças ou estruturas, que são submetidas a esforços mecânicos e que trabalham a temperaturas na zona da temperatura ambiente [6].

A importância económica deste tipo de rotura começou por ser estudada em meados do século XIX, sendo que os primeiros estudos conhecidos sobre fadiga são da autoria do engenheiro alemão Wohler e foram realizados em eixos de locomotivas cujas roturas eram muito frequentes na indústria ferroviária alemã no ano de 1840. O número de roturas por fadiga começou a aparecer com uma frequência cada vez maior o que levou ao aparecimento dos primeiros estudos em fadiga [6].

A investigação em fadiga tem como principais objectivos o desenvolvimento de materiais, métodos de concepção e cálculo de estruturas de forma económica com vista a maximizar a resistência à fadiga [6].

2.5.1 Formação e propagação de fissuras por fadiga

A rotura por fadiga é devida à nucleação e propagação de fissuras que aparecem numa peça sujeita a tensões dinâmicas. O processo de fadiga envolve quatro fases distintas [6]:

- nucleação da fenda (fissura);

- crescimento microscópico da fenda;
- propagação macroscópica da fenda;
- rotura final.

Para a existência de fadiga torna-se então necessário que exista, em primeiro lugar, a nucleação de uma fenda numa determinada região da peça e que a mesma se propague, levando à rotura. Frequentemente, a rotura final ocorre de forma súbita e sem dar sinal, devido ao facto de a mesma não estar visível, apesar dos mecanismos envolvidos no processo de fadiga poderem existir desde o início do funcionamento da peça.

As superfícies de fractura não apresentam sinais de deformação plástica a nível macroscópico devido ao facto de a rotura se dar para tensões aplicadas inferiores à tensão de cedência do material. Apesar de não existir deformação plástica ao nível macroscópico, a mesma existe a nível microscópico, constituindo um processo irreversível de deformação [6].

As roturas por fadiga apresentam as seguintes características comuns (Figura 23):

1. zona de iniciação da fenda;
2. estrias ou bandas indicadoras da propagação da fenda (zona de propagação);
3. zona de fractura frágil final a seguir à zona de propagação da fenda.

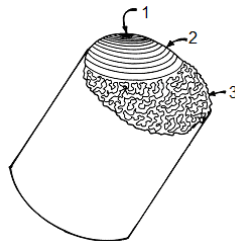


Figura 23 - Representação esquemática da superfície de fractura de um aço [6].

2.5.2 Parâmetros que afectam o comportamento à fadiga

Existe um conjunto de variáveis para que ocorra a rotura por fadiga, que são [6]:

- tensão principal máxima suficientemente elevada (inferior à tensão de cedência);
- variação ou flutuação da tensão aplicada suficientemente grande;
- número de ciclos de tensão aplicada suficientemente grande.

No entanto o comportamento à fadiga é afectado por diversos parâmetros, sendo que a influência dos mesmos não é igual, dependendo das condições de solicitação da peça. Os principais parâmetros que afectam a fadiga são [6]:

- o material e tratamento térmico;
- o acabamento superficial, revestimentos e tensões residuais à superfície das peças;
- a geometria e tamanho da peça;
- a concentração de tensões;
- o meio ambiente (temperatura, humidade, salinidade).

Na inexistência de defeitos internos de relevância, as roturas de componentes sujeitos a fadiga começam à superfície onde se irá iniciar a fenda. Como tal, todos os factores que influenciam o estado superficial são de primordial importância. Particularmente no caso das molas de lâmina utilizadas na indústria automóvel.

Os principais factores que afectam o estado superficial podem ser classificados em três categorias [6]:

1. rugosidade da superfície;
2. variações na resistência à fadiga do material à superfície;
3. tipo e variações na distribuição de tensões residuais à superfície.

A formação de um estado favorável de tensões residuais de compressão à superfície da peça constitui o método mais eficaz de aumentar a resistência à fadiga. A sobreposição de uma tensão residual de compressão na superfície com uma tensão externa aplicada de tracção, diminui a probabilidade de ocorrência de uma rotura por fadiga nesse ponto.

2.5.3 Ensaios de fadiga e análise estatística de resultados

Os ensaios de fadiga são de extrema importância para avaliar a resistência, o limite e para determinar em que condições de solicitação mecânica o material pode trabalhar em segurança.

Na produção de molas de lâmina, os ensaios de fadiga são também habitualmente utilizados para avaliar uma dada alteração ao processo de fabrico ou de parâmetros de um determinado processo. Por questões de custo e de tempo destes ensaios, é prática comum na indústria recorrer a ensaios acelerados para estimar a vida à fadiga.

Estes testes baseiam-se na colocação das molas de lâmina em níveis de tensão muito elevados, muito superiores à sua utilização normal.

De modo a validar estes ensaios é usual recorrer-se a uma análise aos resultados utilizando a distribuição de *Weibull*, pois esta ajusta-se aos dados obtidos mesmo quando existem poucas ou nenhuma falhas. Proposta originalmente por *W. Weibull*, segundo este

critério a função confiabilidade $R(t)$ é definida como o complemento da unidade da função probabilidade acumulada de falha, $F(t)$, representa a distribuição de dano acumulado, ambas em função de t que representa o número de ciclos ou tempo de vida da amostra.

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (3)$$

A função confiabilidade, quando considerada a distribuição de *Weibull* com vida mínima igual a zero, pode ser substituída na equação (1) da seguinte maneira:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (4)$$

Em que η é o parâmetro de escala da curva ou vida característica, e β é o parâmetro de forma ou coeficiente de inclinação da curva.

O parâmetro de forma β é calculado de acordo com a seguinte equação:

$$\frac{\sum_{i=1}^n (t_i)^\beta \ln(t_i)}{\sum_{i=1}^n (t_i)^\beta} - \frac{1}{\beta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(t_i) \quad (5)$$

onde n é o número de amostras, e t é o número de ciclos de cada uma das amostras.

Sendo um parâmetro de forma, pode-se afirmar que o β é um caracterizador da dispersão dos resultados. Por exemplo, para $\beta = 1$, têm-se a distribuição exponencial (falhas aleatórias). Para valores de $\beta < 1$, a taxa de falhas diminui com o tempo (falha prematura ou infantil), e para $\beta > 1$ a taxa de falhas aumenta com o tempo (descrição mais consentânea com os ensaios de fadiga de molas).

O parâmetro de escala η é calculado segundo a equação:

$$\eta = \left[\sum_{i=1}^n \frac{t_i^\beta}{n} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (6)$$

Este parâmetro define a posição, ao longo da abscissa, da distribuição de *Weibull*. Esta posição é chamada de vida característica. Substituindo η no lugar de t na equação 2:

$$F(t = \eta) = 1 - e^{-1} = 63,2\% \quad (7)$$

Isto significa que para cada distribuição de *Weibull*, a probabilidade de falha com tempo (ou quantidade de ciclos) igual a η é igual a 63,2%, chamada de vida característica. Isto é válido para qualquer valor de β .

A partir da distribuição de *Weibull*, pode-se definir a expectativa de vida de um componente em função da probabilidade de falha, conforme os critérios e características próprias de cada projecto. De uma maneira geral, a indústria utiliza a vida, B50 para padronização e comparação de resultados de ensaios de fadiga, ou seja, o limite em que pelo menos 50% das amostras sobrevive.

2.6 Conclusões

Neste capítulo descreveu-se o processo de fabricação das molas de lâmina para a indústria automóvel, acentuando-se os processos tecnológicos que conduzem à redução do nível de tensões residuais de tracção na superfície, fornecendo a vida à fadiga do componente.

Industrialmente, o processo mais utilizado é o processo de *shot peening*, mais eficaz, técnica e economicamente. No entanto, devido à falta de informação tem-se investigado os efeitos do *shot peening*, no módulo e perfil de tensões residuais.

Actualmente a eficácia e repetibilidade do processo de *shot peening* são normalmente avaliadas na indústria através da intensidade de Almen e da percentagem de área superficial tratada.

3 Procedimento experimental

3.1 Introdução

Neste capítulo descreve-se e justifica-se o procedimento experimental adoptado e os ensaios realizados. É ainda apresentada uma caracterização do material base, bem como, a descrição do equipamento e ferramentas utilizadas.

3.2 Ensaios preliminares

Tendo este trabalho como objectivo analisar o efeito do tratamento superficial de *shot peening* na resistência à fadiga das molas de lâmina, medida através da intensidade de Almen, começou-se por estudar o principal factor que afecta a resistência à fadiga e que é a granalha para isso estudou-se o comportamento/desgaste da granalha utilizada no processo comparando-a com os valores de intensidade Almen.

Inicialmente fez-se diariamente o teste granulométrico, tendo-se comparando à *posteriori* os resultados alcançados, com os obtidos no teste de Almen. O teste granulométrico consiste numa crivagem de uma amostra representativa retirada da máquina de *shot peening*, em crivos com dimensões de 0,4, 0,63 e 0,8 mm. Este estudo foi realizado nos dois equipamentos existentes para *shot peening* designados por máquina 623 e 624.

Após este estudo, numa primeira fase, estudou-se a influência do processo de *shot peening* com intensidades de Almen elevadas, de modo a avaliar as possíveis consequências (benéficas ou prejudiciais) que estas intensidades possam trazer para as molas de lâmina. Pretendendo-se definir deste modo uma especificação para a intensidade de Almen que maximize a vida à fadiga. Numa segunda fase estudou-se o efeito individual dos principais parâmetros que influenciam o processo, de modo a maximizar a produtividade e otimizar os recursos utilizados.

3.3 Primeira fase

Nesta fase foram produzidas 24 molas de acordo com o projecto de uma monolâmina parabólica utilizada num veículo ligeiro comercial, as mesmas foram divididas em 4 grupos de 6 (A, B, C, D) onde cada grupo foi sujeito ao processo de *shot peening* a diferentes intensidades de Almen. Dentro de cada grupo, 5 molas foram destinadas a ensaios de fadiga, sendo a última destinada à análise dos perfis de tensões residuais assim como a análise metalográfica e de dureza.

3.3.1 Caracterização do material

O aço utilizado na fabricação das molas de lâmina é o 51CrV4 conforme a norma DIN 59145, sendo a composição química apresentada na Tabela 1. As principais características mecânicas, resultantes do ensaio de tracção são apresentadas na Tabela 2. A matéria-prima foi analisada segundo: o tamanho de grão, descarbonetação, nível de inclusões, estrutura e dureza.

Para além dos parâmetros de matéria-prima controlados e dentro das especificações, é necessário garantir que as variáveis do processo também estejam estáveis para todas as amostras. Para isso todas as lâminas foram produzidas em simultâneo (mesmo lote), de acordo com o processo normal de conformação e têmpera, com os parâmetros indicados na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros de processo para a produção das amostras

Temperatura de laminação	1000°C
Temperatura de têmpera	900°C
Temperatura do óleo de têmpera	70°C
Temperatura de revenido	400°C

3.3.1 Shot peening

Cada grupo de molas foi submetido ao processo de *shot peening* sendo a variação de intensidade obtida através da utilização de diferentes caudais de alimentação das turbinas.

As intensidades foram quantificadas através do teste de Almen onde uma chapa (chapa de Almen) de material (SAE 1070) e dimensão padronizada foi granalhada. Neste teste a chapa de Almen foi presa a um bloco de aço e exposta ao granalhamento num dos lados, durante um determinado tempo. Após retirar a chapa do suporte foi medida a altura do arco produzido num relógio comparador padrão (Figura 24).

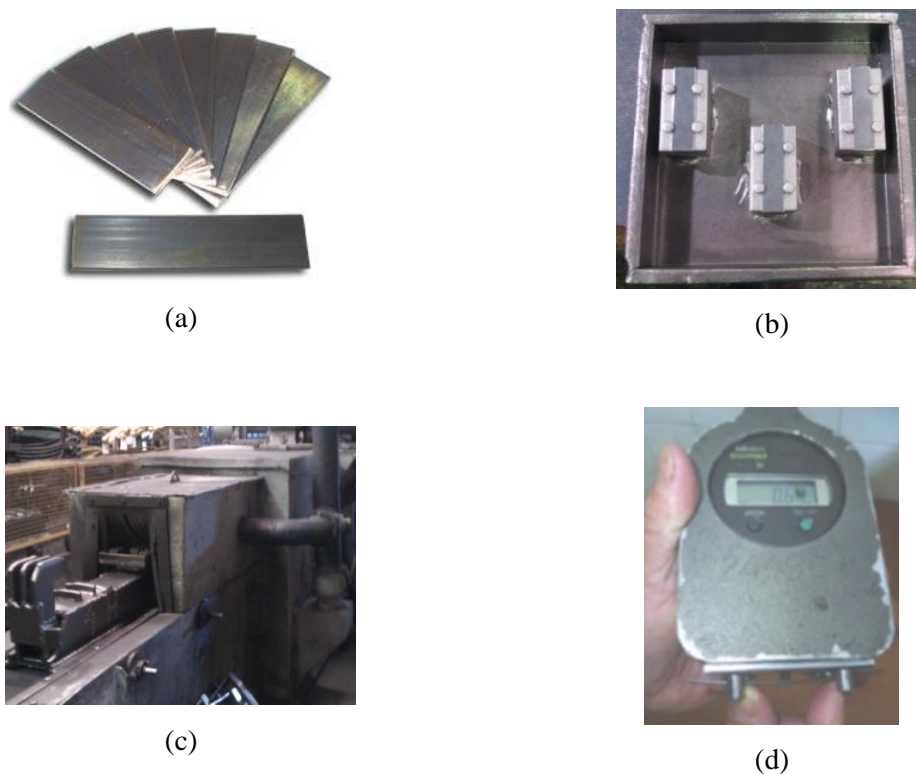


Figura 24 - Execução do teste de Almen: a) chapas de Almen; b) Bloco padrão; c) Equipamento de *shot peening*; d) Relógio comparador

O processo de *shot peening* foi realizado num equipamento com as características apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Características da máquina de *shot peening* (Máquina 622)

Granalha utilizada	Arame cortado arredondado G1 - \varnothing 0,9 mm
Número de turbinas	2
Potência turbina	45 kW
Número de pás/turbina	8
Diâmetro externo da turbina	305 mm
Diâmetro interno da turbina	125 mm
Largura da pá	100 mm
Distância da turbina à mola	500 mm
Velocidade de rotação da turbina	2370 rpm
Velocidade do transportador	4 m/min

3.3.2 Ensaio de fadiga

Dentro de cada grupo de molas, cinco, foram sujeitas a ensaios de fadiga com frequência e amplitude constante. Os parâmetros de ensaio foram definidos de modo a que o número de ciclos obtido não implicasse a utilização de um tempo muito elevado para a empresa com o consequente custo, os mesmos não constituíram um problema pois apenas se pretendia comparar diferentes parâmetros de processo de fabrico.

Como durante o teste de fadiga apenas é controlada a amplitude de deslocamento foi necessário obter as alturas: mínima e máxima a aplicar na máquina de ensaios de fadiga (Figura 25). De acordo com os dados existentes na empresa foi aplicada uma carga máxima de 800 Kg na balança de prova sendo esta carga transformada numa amplitude de deslocamento da mola, onde foi medida a altura da lâmina face à posição sem carga. A altura obtida (altura mínima) foi transferida para o equipamento de fadiga sendo aplicado o curso máximo permitido pela máquina de 150 mm (altura máxima), como se pode observar pela Figura 25.

Após o teste de fadiga foram registados os ciclos máximos obtidos por cada lâmina, assim como a localização da fractura e a espessura da mesma.

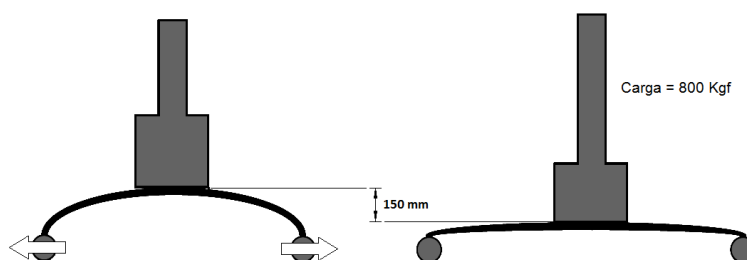


Figura 25 - Esquema do ensaio de fadiga



Figura 26 - Máquina de ensaios de fadiga utilizada

3.3.3 Análise de tensões residuais

Os perfis de tensão residual foram analisados através da técnica de difracção de raios X segundo o método $\sin \Psi^2$. Esta análise foi realizada, no Centro de Investigação de Materiais da Frauenthal Automotive localizado em França. Foram enviadas para análise 4 amostras representativas dos 4 grupos estudados. As amostras tinham 300 mm de comprimento e 70 mm de largura (Figura 27).



Figura 27 - Amostras enviadas para análise

As mesmas foram retiradas segundo a especificação interna da empresa que refere que a amostra deve ser retirada após a zona plana da mola a 100 mm do furo central devendo a medição ser efectuada a meia largura (Figura 28). O corte foi feito sob refrigeração para evitar o aquecimento da superfície.

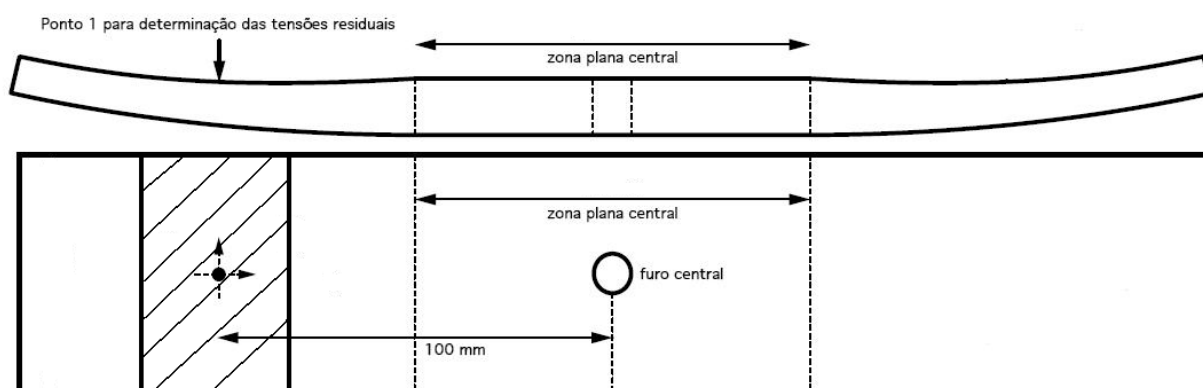


Figura 28 - Localização da amostra sujeita a análise de tensões residuais

As tensões residuais foram controladas na superfície e em profundidade tendo sido determinadas segundo os parâmetros de medição apresentados na Tabela 7. Estes parâmetros foram seleccionados de modo a cumprir com a norma interna da empresa e garantir a repetibilidade dos resultados obtidos.

Tabela 7 – Parâmetros para ensaios de medição das tensões residuais

Parâmetros de medição			
Radiação	Crka (alfa)	Intensidade (mA)	5
Equipamento	X3000 G2	Tensão (kV)	27
Método	Psi	Ângulo 2θ	156.33
Hkl	211	E (211) MPa	221239
Material	steel	V (211)	0.272
Peak shift	Cross correlation	U (1/mm)	89.7
Detect used	AB	Collimator(mm)	3
Tempo de exposição (s)	5	Psi Osc \pm	3
Psi	-7/6	CalibNotes	10.46
Psi (°)	-42/42	Filtro	None
Phi	0,-90	PhiOsc	0°/0
$\frac{1}{2} S2$	$5,75^E-06$	S1	$-1,23^E-06$

3.3.4 Análise metalográfica

Após o processo de *shot peening* foi retirada uma amostra de material com aproximadamente 30 mm transversalmente ao comprimento da mola para cada condição de ensaio (Figura 30). Para este corte foi utilizado o serrote mecânico para obtenção de amostras com uma dimensão que permitisse a utilização da máquina de corte existente no laboratório (Figura 29).



Figura 29 - Serrote de corte mecânico

As amostras foram então cortadas de acordo com a Figura 30, sendo que no final a amostra ficou com aproximadamente 20 mm após eliminar as entradas do disco de corte (5 mm de cada lado).

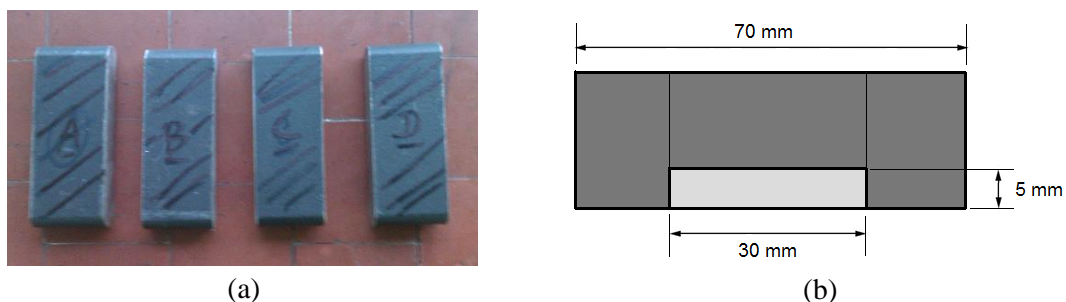


Figura 30 - (a) amostras recolhidas de material; (b) representação do corte efectuado

Posteriormente foi efectuada a montagem e polimento da amostra de modo a proceder aos ensaios de dureza, micrografia e descarburacção assim como para identificação de defeitos existentes na superfície em tracção sujeita ao *shot peening*.



Figura 31 – Amostras após montagem e polimento

3.3.5 Medição de durezas

Os ensaios de dureza foram realizados com um indentador Vickers segundo a norma DIN EN ISO 6507-1 e a especificação interna da Empresa. A norma interna exige um valor entre os 491 e 533 HV a 0,4 mm da profundidade total da mola no lado em tracção e no lado em compressão. Sendo que a 0,15 mm de profundidade do lado de tracção e a 0,20 mm do lado de compressão deverá estar garantido pelo menos 80% do valor de dureza mínimo, isto é, 392,8 HV. Este ensaio deve ser feito em pelo menos 3 zonas da amostra recolhida: esquerda, centro e direita. Por último a norma exige também que seja garantida uma dureza mínima de 491 HV a aproximadamente 25% e 75% da espessura da amostra, medida esta feita ao centro da amostra.

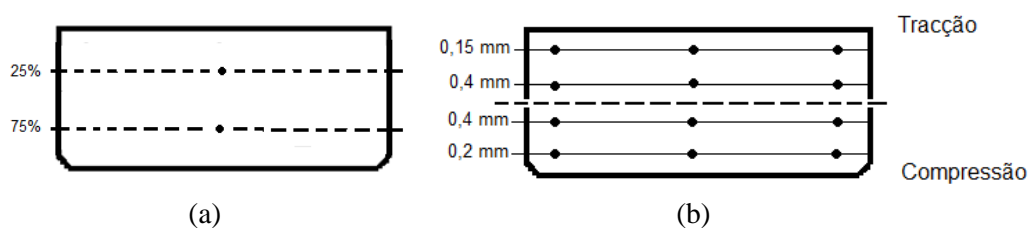


Figura 32 – Zonas de medição de durezas

3.4 Segunda fase – Métodos de Taguchi

Nesta fase da experimentação foi aplicado o método de Taguchi com o objectivo de otimizar e identificar quais os parâmetros (controláveis) que influenciam de forma significativa o processo, quantificando-os e identificando os níveis ideais para os mesmos. Com base nesta optimização espera-se conseguir que exista uma manutenção da vida à fadiga das molas de lâmina, utilizando menos recursos e diminuindo a variabilidade do processo.

Como características da qualidade foram definidas: a **intensidade Almen** (maior-é-melhor), o **ponto de saturação** (menor-é-melhor) e a **rugosidade** (menor-é-melhor). Com base nas mesmas foram seleccionadas as seguintes variáveis independentes (factores):

- dimensão da granalha;
- velocidade da turbina;
- velocidade do tapete (tempo de exposição);
- caudal de alimentação.

Foram definidos 3 níveis para cada variável, visto ser pretendido não só verificar se os factores seleccionados afectavam significativamente o processo, mas também para afinar o mesmo, tendo sido escolhida a matriz ortogonal do tipo L9, devido ao facto de existirem 2 graus de liberdade e por ser a mais eficiente do ponto de vista económico. Para o factor granalha foram definidos três níveis medidos através da percentagem de granalha do total presente no equipamento de *shot peening*. Quanto aos factores velocidade da turbina, velocidade do tapete (tempo de exposição) e caudal de alimentação os níveis foram medidos através da percentagem do valor aplicado actualmente no equipamento de *shot peening* (Tabela 8).

Tabela 8 – Variáveis independentes (factores) em estudo

Variáveis independentes (factores)			
% Granalha >0,8 mm	% Velocidade da turbina	% Velocidade do tapete	% Caudal de alimentação
80	90	90	90
80	100	100	100
80	110	110	110
75	90	100	110
75	100	110	90
75	110	90	100
70	90	110	100
70	100	90	110
70	110	100	90

Para cada condição de ensaio foi registada a intensidade de Almen, o ponto de saturação e a rugosidade obtida. Aos dados obtidos aplicou-se a análise de respostas médias, à média e à razão sinal-ruído, e a análise de variância, com utilização de polinómios ortogonais, à razão sinal-ruído. Estas análises irão permitir identificar os factores significativos e os melhores níveis dos factores.

4 Resultados e discussão

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios realizados nas várias fases do trabalho.

4.1 – Análise granulométrica da granalha e correlação com a intensidade de Almen nos equipamentos.

Na máquina 623 o desgaste da granalha é linear diminuindo a percentagem de teor de granalha maior que 0,8 mm aumentando consequentemente o teor de granalha maior que 0,63 e 0,4 mm, sendo o nível de pó (diâmetro inferior a 0,4 mm) bastante baixo (Figura 33). Esta tendência ocorre até à adição de granalha nova pelo facto de não existir nenhum controlo de adição de granalha automático.

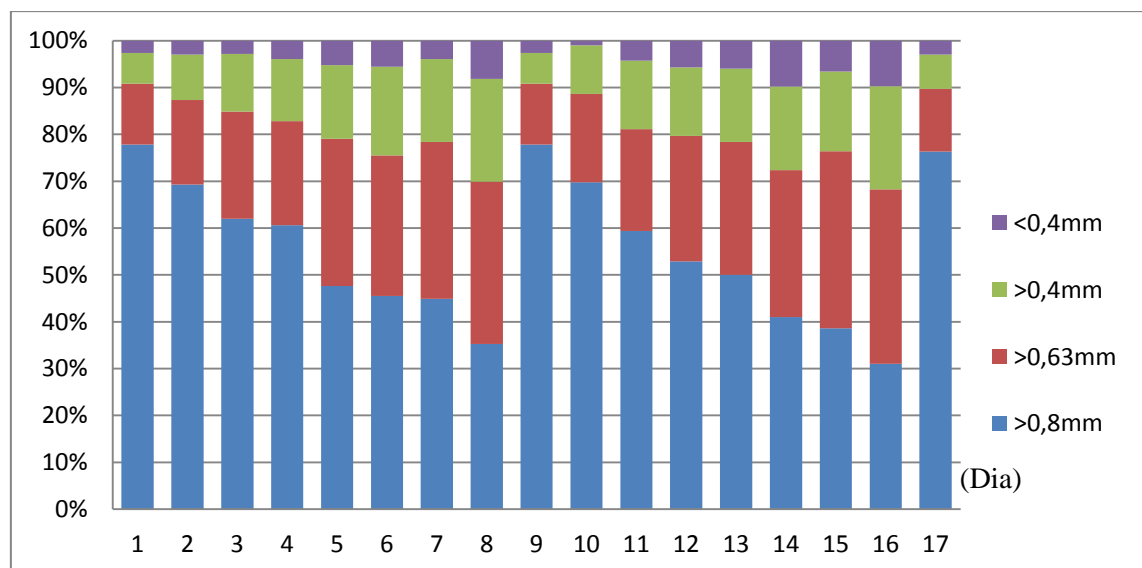


Figura 33 – Desgaste granulométrico na máquina 623

Na máquina 624 o comportamento não é tão linear pois existe um controlo automático quanto à adição de granalha nova, mas pode-se destacar a ocorrência de quedas abruptas dos valores granulométricos aquando da falta de granalha (nova) no tanque de armazenamento (Figura 34).

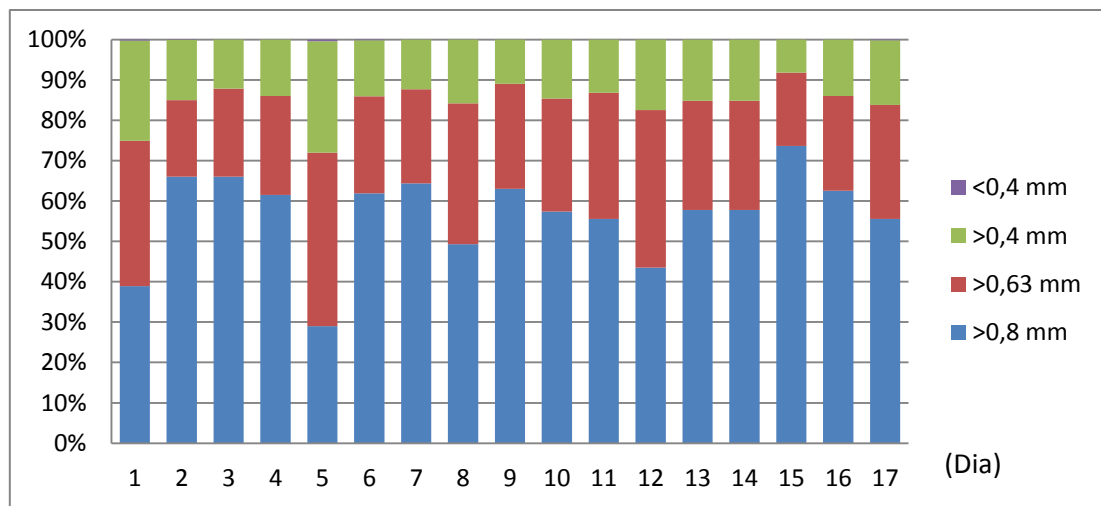


Figura 34 – Desgaste granulométrico na máquina 624

A intensidade Almen foi medida diariamente tendo-se obtido os seguintes resultados para a máquina 623 e 624 apresentados na Figura 35 e 36 respectivamente. Como se pode observar existe uma grande variabilidade no que toca à intensidade produzida no processo de *shot peening* (valores muitas vezes fora de especificação). Este facto é em parte explicado pelo desgaste da granalha, mas tendo em conta a especificação actual (entre 0,6mm e 0,9mm) e sendo o valor superior apenas utilizado por uma questão de protecção da máquina, não se entra em conta com a acção que estas intensidades elevadas possam vir a ter na vida à fadiga das molas de lâmina.

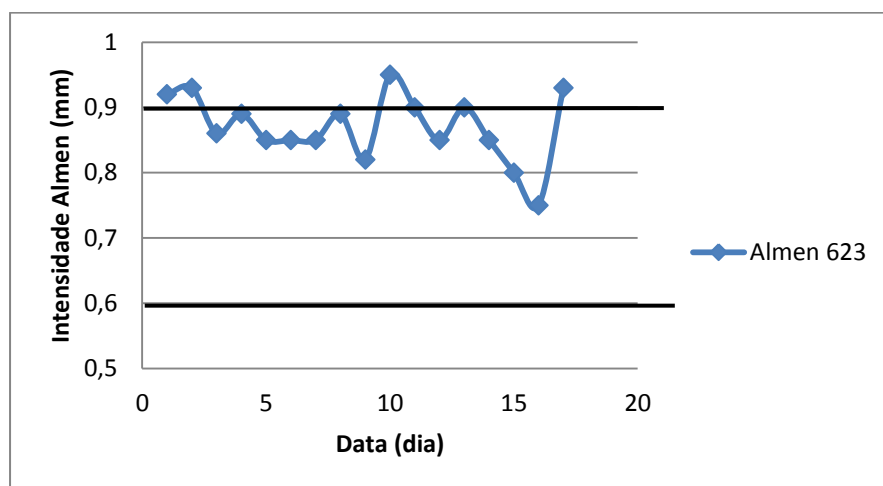


Figura 35 – Intensidade Almen na máquina 623

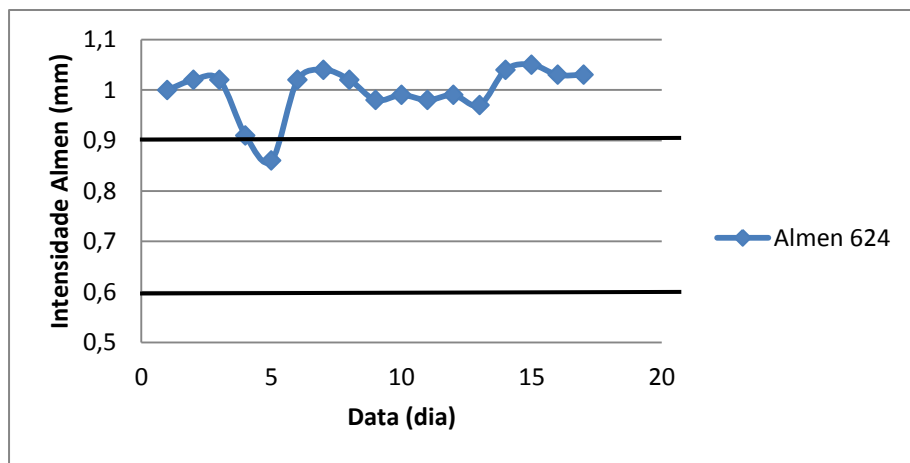


Figura 36 – Intensidade Almen na máquina 624

Numa segunda fase e analisando já todos os factores que influenciam a intensidade do processo (não só a granalha) realizou-se o teste de saturação obtendo-se as curvas de saturação nas máquinas 623 e 624. Como se pode observar para a máquina 623 (Figura 37) o ponto de saturação ocorre para um valor de Almen e exposição acima do especificado (ponto a vermelho). Já na máquina 624 (Figura 38) o mesmo ocorre para um tempo de exposição inferior apesar de o mesmo ocorrer para um valor de Almen acima do especificado, o que indica que o processo poderia ser acelerado.



Figura 37 – Curva de saturação na máquina 623

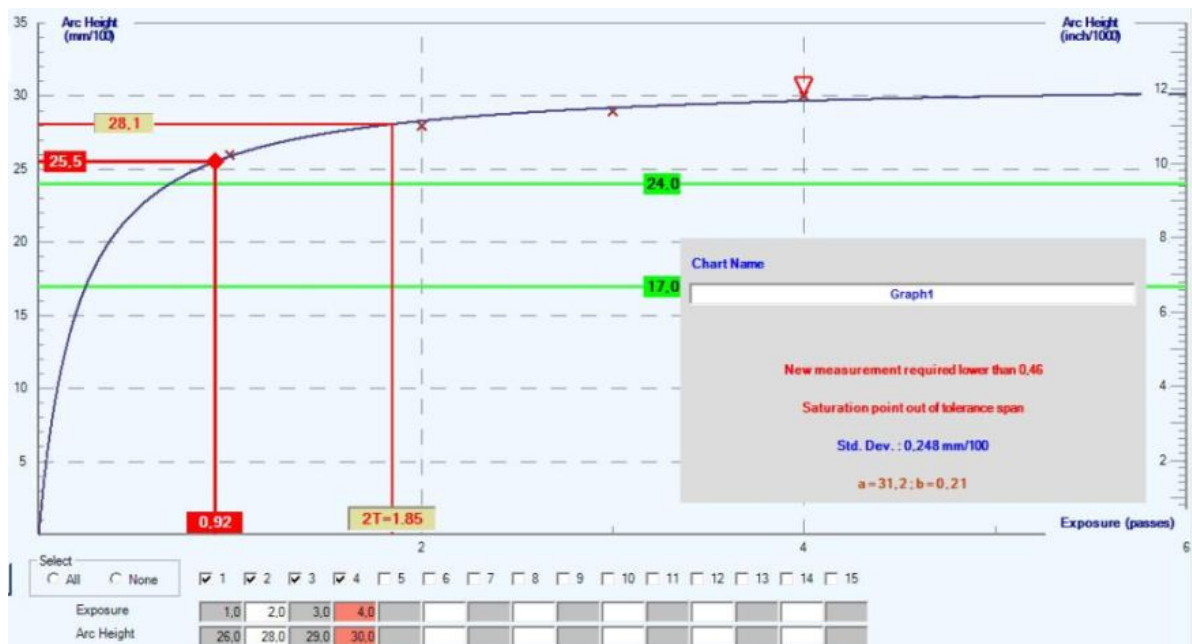


Figura 38 – Curva de saturação na máquina 624

4.1 Primeira fase

4.1.1 Shot peening

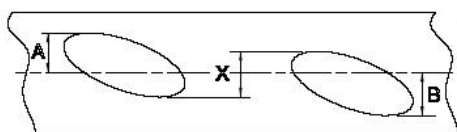
Cada grupo de molas (A,B,C,D) foi submetido ao processo de *shot peening* tendo sido obtidas as intensidades Almen indicadas na Tabela 9 para cada grupo em análise.

Tendo a variação de intensidade sido obtida através da utilização de diferentes caudais de alimentação das turbinas, não se conseguiu aumentar de forma significativa a intensidade de Almen ao centro. Este facto é explicado pelo deficiente alinhamento das turbinas, que tinham uma orientação focada para o limite do campo de trabalho devido à necessidade de limpar algumas impurezas (carepa) nos bordos das lâminas, provenientes de processos de fabrico anteriores.

Tabela 9 – Intensidade de Almen obtida para cada grupo de molas testado

Lado/Ensaio	A	B	C	D
Esq	1,12	0,8	1,22	1,27
Cent	0,89	0,75	0,97	0,97
Dir	1,12	0,8	1,22	1,27

Este alinhamento é avaliado através do teste do ponto quente, onde uma chapa de aço é colocada num suporte próprio e submetida ao processo de *shot peening*. Neste teste obtém-se uma impressão azul conforme a Figura 39 que representa a zona de incidência do processo produzida por cada turbina sendo que as impressões obtidas têm de respeitar a norma interna da Empresa.



$X > 10 \text{ mm}$

$A > 120 \text{ mm}$

$B > 120 \text{ mm}$

Figura 39 – Impressão obtida no teste do ponto Quente

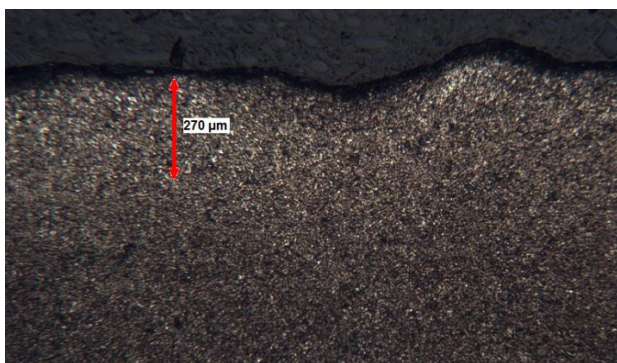
Apesar do resultado obtido no teste do ponto quente (Figura 40) estar conforme o especificado pela norma interna da Empresa este alinhamento focado para os limites do campo de trabalho traz alguns problemas, nomeadamente quando são granalhadas 3 molas ao mesmo tempo, pois a mola colocada ao centro, está sujeita a uma intensidade mais baixa. Outro problema é o facto de este alinhamento provocar um maior desgaste do equipamento face ao alinhamento normal, pois chega a sair da zona de trabalho, criando um maior desgaste nas paredes internas da máquina, exigindo a troca precoce dos painéis de revestimento.



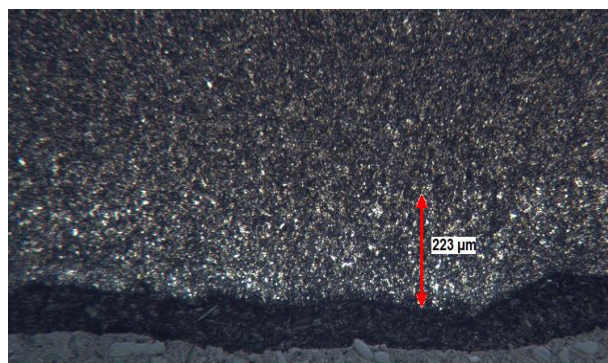
Figura 40 - Resultado do ponto quente na máquina 622 (Turbina 1)

4.1.2 Análise metalográfica

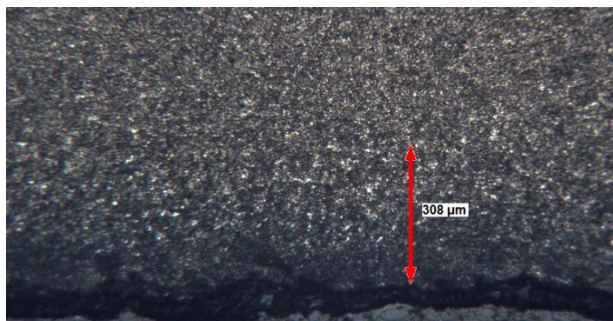
Em todas as amostras (A, B, C e D) sujeitas a análise foi observada martensite revenida, com uma estrutura bastante homogênea. Observa-se que a descarburização é maior nas amostras em que a intensidade de Almen medida era maior. Isto deve-se ao facto de que com o aumento da temperatura existe um aumento da descarburização devido à difusão do carbono, gerando assim uma maior intensidade de Almen.



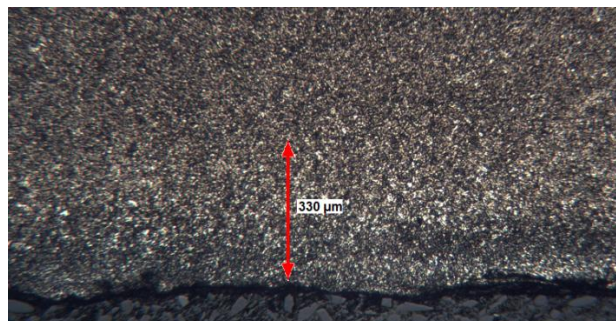
Amostra A



Amostra B



Amostra C



Amostra D

Figura 41 – Descarburização à superfície para cada grupo de molas testado

Do mesmo modo e como seria expectável, nota-se que existem mais defeitos à superfície nas amostras sujeitas a intensidades elevadas. Identificaram-se também vários defeitos de sobreposição (*overlap*) nas amostras em análise (Figura 42). Este defeito superficial é causado por uma deformação excessiva nesta região, que leva a que camadas do material se sobreponham. Estes defeitos são mais evidentes quando as molas são sujeitas a intensidades mais altas. Estes defeitos geram concentrações de tensões na zona afectada sendo locais propícios à nucleação de fissuras por fadiga.

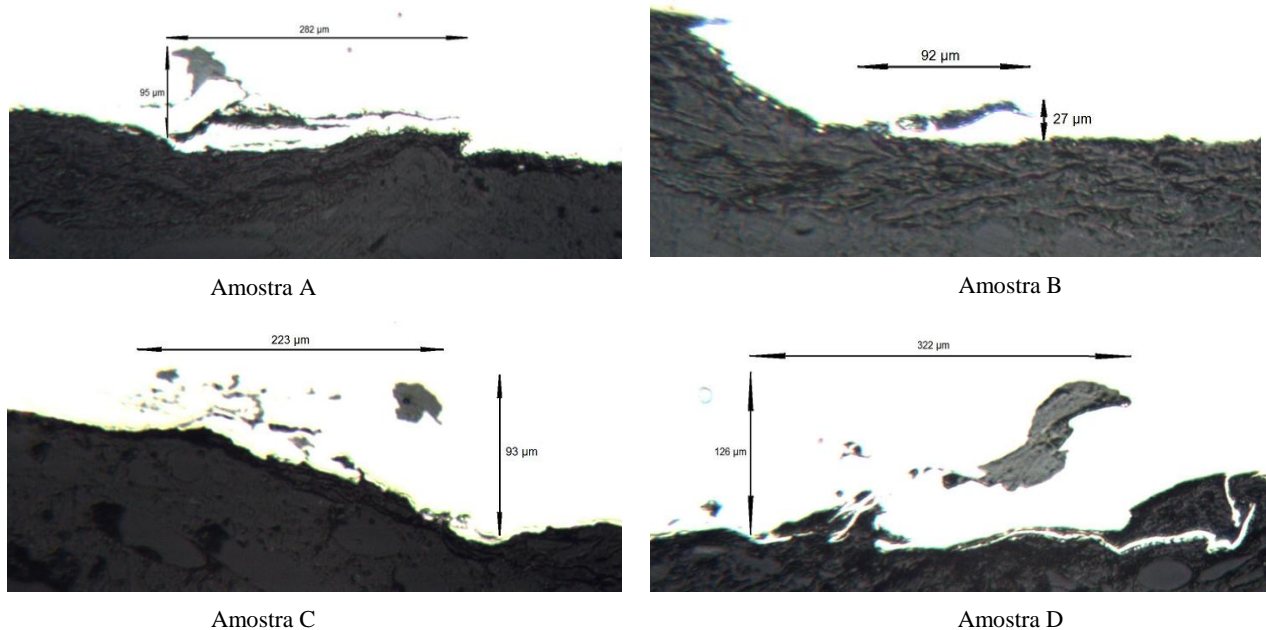


Figura 42 – Defeitos de sobreposição (overlap) para cada grupo de molas testado

4.1.3 Análise de durezas

Os resultados dos ensaios de dureza apresentam-se na Tabela 10. Esta análise tinha como objectivo identificar se o aumento de descarburização presente após o processo de *shot peening* influenciava de forma significativa a dureza à superfície. Verifica-se sempre que a dureza é menor à superfície do que a 0,4 mm de profundidade indicando uma descarburização à superfície. Contudo os valores de dureza medidos à superfície continuam dentro da especificação da Empresa, pelo que a descarburização não constitui um problema do ponto de vista da resistência das lâminas.

Tabela 10 – Resultados dos ensaios de dureza para as várias amostras

	Profundidade (mm)	AMOSTRA A			AMOSTRA B			AMOSTRA C			AMOSTRA D		
		Esq	Cent	Dir	Esq	Cent	Dir	Esq	Cent	Dir	Esq	Cent	Dir
Tracção	0,15	467	482	475	482	467	475	467	464	453	494	490	498
	0,4	524	533	524	520	529	533	524	507	515	528	528	533
Compressão	0,2	503	498	490	498	495	498	482	479	486	498	495	498
	0,4	533	529	533	529	533	524	520	507	515	513	520	524
	25%	-	514	-	-	514	-	-	514	-	-	519	-
	75%	-	519	-	-	519	-	-	519	-	-	514	-

4.1.4 Ensaios de fadiga

Cada grupo de amostras de molas foi submetido a ensaios de fadiga registando-se o número de ciclos à rotura. Os resultados obtidos estão na Tabela 11.

Tabela 11 – Número de ciclos à fadiga

Mola/Ensaio	A	B	C	D
1	40005	21545	32817	40384
2	37215	31222	40558	37754
3	35323	28393	10207	38595
4	28204	31831	33394	33041
5	38896	38555	35392	40075

Na tabela 12 apresenta-se para cada amostra, a espessura medida após ensaio de fadiga e a localização da rotura. Verifica-se que no grupo C, a mola 3, teve um resultado bastante inferior aos das restantes molas do grupo. Este facto pode ser explicado pela existência de um defeito no material base proveniente da laminagem, que levou à fractura precoce da mola e que se ilustra na Figura 43.

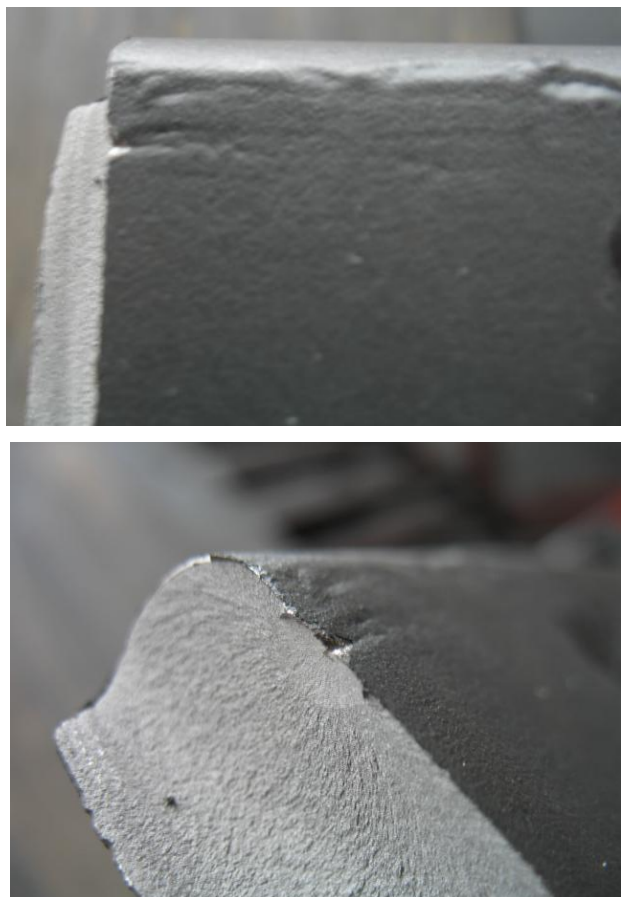


Figura 43 – Defeito e zona de início de fractura (mola C3)

Identificou-se também que no grupo A, a mola 4 apresentou igualmente um resultado inferior aos obtidos no seu grupo. Após análise verificou-se que a mesma apresentava uma espessura inferior ao especificado no projecto na zona de fractura.

Tabela 12 – Localização e espessura de laminagem na zona de fractura

Mola/Ensaio	A		B		C		D	
	Loc.	Esp.	Loc.	Esp	Loc.	Esp.	Loc.	Esp.
1	Frente 106mm	12,7	Frente 250mm	12,17	Frente 118mm	12,25	Trás 125mm	12,05
2	Trás 105mm	12,4	Trás 114mm	12,19	Trás 114mm	12,2	Frente 114mm	12,11
3	Frente 110mm	12,44	Trás 100mm	12,25	Frente 80mm	12,9	Frente 114mm	12,3
4	Trás 116mm	12,28	Trás 155mm	12,15	Frente 114mm	12,25	Frente 118mm	12,26
5	Trás 114mm	12,45	Frente 110mm	12,41	Trás 122mm	12,3	Trás 115mm	12,17

Após exclusão dos ensaios atrás identificados, obtiveram-se os seguintes valores médios para cada condição de ensaio, conforme a tabela abaixo.

Tabela 13 – Numero médio de ciclos à fadiga

Amostra	A	B	C	D
\bar{X} Ciclos	37859	30309	35540	37970

A Figura 44 permite comparar os resultados dos ensaios de fadiga com os valores da intensidade de Almen para cada condição de ensaio. Observa-se então que ocorre uma estagnação da vida à fadiga com valores de Almen elevados (acima do limite especificado), observando-se uma pequena diminuição do número médio de ciclos à fadiga para as condições de ensaio C. Este resultado ocorre devido à competição entre os dois principais mecanismos que influenciam a vida à fadiga ao mesmo tempo:

- o aumento das tensões residuais de compressão na superfície (positivamente);
- o aumento da rugosidade e dos defeitos superficiais (negativamente).

Sendo expectável desde logo que com o aumento da intensidade de *shot peening*, os resultados obtidos à fadiga tenham uma dispersão cada vez maior.

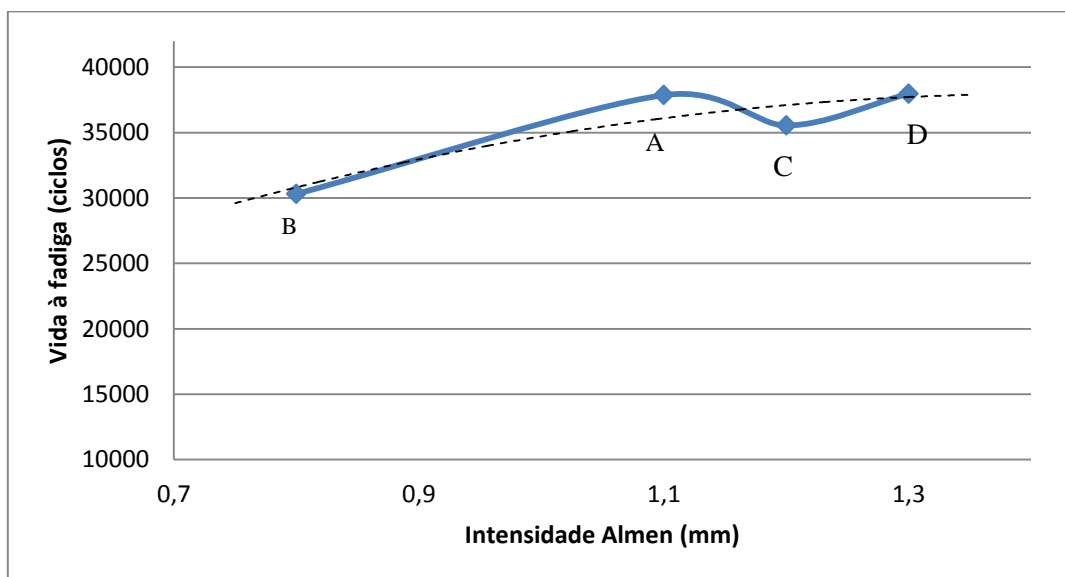


Figura 44 - Vida à fadiga vs Intensidade Almen para as diferentes condições de ensaio

4.1.5 Análise de tensões residuais

Na Tabela 14 apresentam-se os resultados da análise de tensões residuais medidas à superfície e em profundidade (100, 200 300 e 400 μm aproximadamente). No Gráfico 8 podem-se observar os perfis de tensão residual obtidos para cada condição de ensaio.

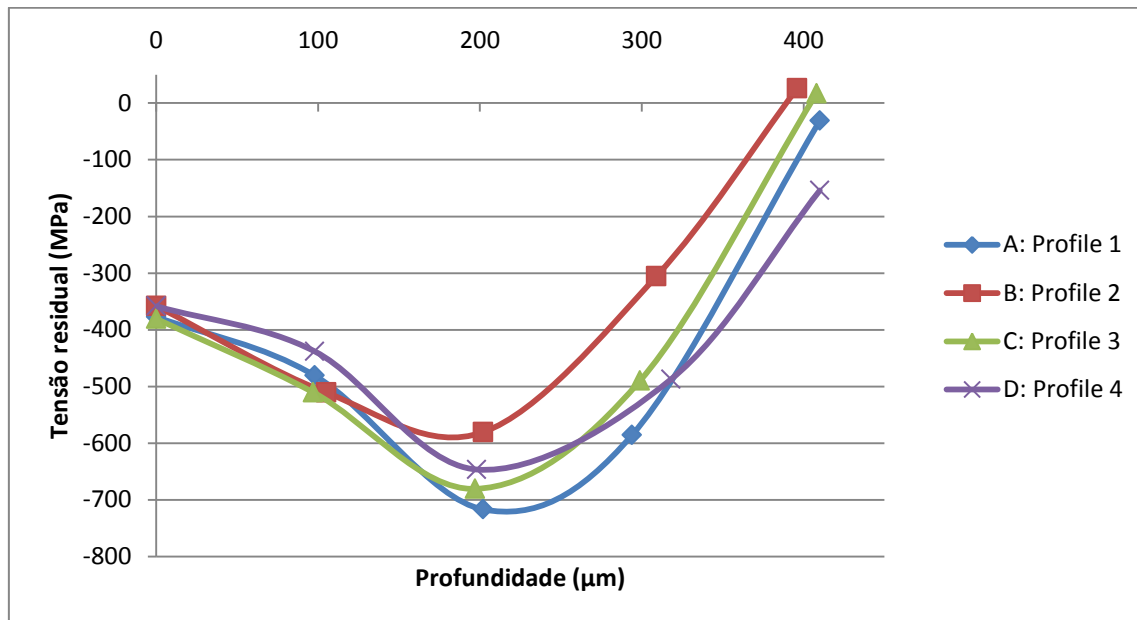


Gráfico 1 – Perfis de tensão residual obtidos

Tabela 14 – Resultados dos ensaios de tensões residuais para as diferentes condições de ensaio

A			B		
Profundidade (μm)	Perfil 1 (MPa)	FWHM ($^{\circ}$)	Profundidade (μm)	Perfil 2 (MPa)	FWHM ($^{\circ}$)
0	-377,1	3,53	0	-358	3,23
98	-480,9	3,28	105	-510,6	3,45
202	-716,8	3,33	202	-580,4	3,63
294	-585,6	3,66	309	-305,6	3,85
410	-31,4	3,94	396	25,8	3,95

C			D		
Profundidade (μm)	Perfil 3 (MPa)	FWHM ($^{\circ}$)	Profundidade (μm)	Perfil 4 (MPa)	FWHM ($^{\circ}$)
0	-380,6	3,35	0	-358,3	3,48
97	-510,3	3,07	98	-438,2	3,27
197	-680,5	3,26	198	-646,4	3,19
299	-489,5	3,62	318	-487,4	3,62
408	17	3,89	410	-154,2	3,92

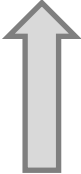
A análise do perfil de tensões residuais foi avaliada com base em três características:

- tensão à superfície;
- tensão de compressão máxima;
- profundidade da camada em compressão.

Ao analisarmos a **tensão à superfície** observa-se que a tensão residual é maior para as condições de ensaio C e A, sendo que D e B apresentam valores mais baixos.

Este facto pode ser explicado devido às tensões residuais de compressão à superfície serem influenciadas positivamente com o aumento da dureza do material, que por sua vez, aumenta com o aumento da intensidade de Almen. Contudo para intensidades de Almen muito elevadas existe maior nível de decarburização, que leva a uma diminuição da dureza à superfície, este facto pode em parte explicar o resultado obtido pelas condições de ensaio D.

Tabela 15 – Tensão à superfície

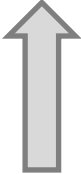


Tensão residual (MPa)	Ensaio
-380,6	C
-377,1	A
-358,3	D
-358	B

Verifica-se ainda que a **tensão de compressão máxima** é maior para as condições de ensaio A e C, sendo que D e B apresentam valores mais baixos.

A tensão compressiva máxima à semelhança da tensão à superfície é também influenciada positivamente, pelo aumento de dureza. Importa no entanto realçar que neste caso existe uma troca entre A e C, mas sendo o diferencial muito pequeno e sendo que C apresenta maior decarburização que A, este facto fica em parte explicado.

Tabela 16 – Tensão compressiva máxima

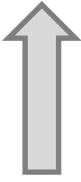


Tensão residual (MPa)	Ensaio
-716,8	A
-680,5	C
-646,4	D
-580,4	B

Analisando a **profundidade da camada em compressão** observa-se que a 400 μm , profundidade máxima medida, a tensão residual em compressão é maior para as condições de ensaio D e A, sendo que C e B apresentam já valores de tensão residual de tracção.

A profundidade da camada em compressão aumenta com o aumento da intensidade de Almen e diminui com o aumento de dureza da peça. O que é coerente com os resultados obtidos pois a intensidade Almen no ensaio D foi a mais elevada, sendo B a que apresenta o valor mais baixo. Entre A e C não se podem retirar grandes conclusões pois a diferença é muito baixa.

Tabela 17 – Tensão residual a 400 μm



Tensão residual (MPa)	Ensaio
-154,2	D
-31,4	A
17	C
25,8	B

4.2 Segunda fase

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos vários ensaios realizados na aplicação do método de Taguchi com base na característica da qualidade avaliada através da:

- intensidade de Almen;
- rugosidade;
- saturação.

4.2.1 Intensidade de Almen

A intensidade do processo, medida através da intensidade de Almen, chegou-se aos resultados apresentados na Tabela 18. Na Figura 45 é possível identificar os melhores níveis dos factores e os factores significativos, quando comparados com os efeitos dos restantes. Neste gráfico identifica-se que o parâmetro que mais influencia o processo, é a velocidade de projecção da granalha (velocidade da turbina) sendo esta variação linear. Identifica-se também o nível 3 como sendo o óptimo (velocidade mais alta).

Tabela 18 – Resultados obtidos para a intensidade de Almen para cada condição de ensaio.

	P1	P2	P3	P4	Almen				
	% Granalha > 0,8mm	% Velocidade da turbina	% Velocidade do tapete	% Caudal	1	2	3	S/N	Média
1	79,3	90	90	90	0,18	0,17	0,18	-15,0664	0,176667
2	79,3	100	100	100	0,22	0,21	0,21	-13,4251	0,213333
3	79,3	110	110	110	0,27	0,26	0,27	-11,4848	0,266667
4	76,6	90	100	110	0,17	0,16	0,17	-15,5737	0,166667
5	76,6	100	110	90	0,22	0,22	0,21	-13,2905	0,216667
6	76,6	110	90	100	0,27	0,26	0,25	-11,7134	0,26
7	68,8	90	110	100	0,18	0,18	0,17	-15,0664	0,176667
8	68,8	100	90	110	0,22	0,21	0,22	-13,2905	0,216667
9	68,8	110	100	90	0,26	0,25	0,26	-11,8171	0,256667
								S/N	-13,4142
								SST	19,32026

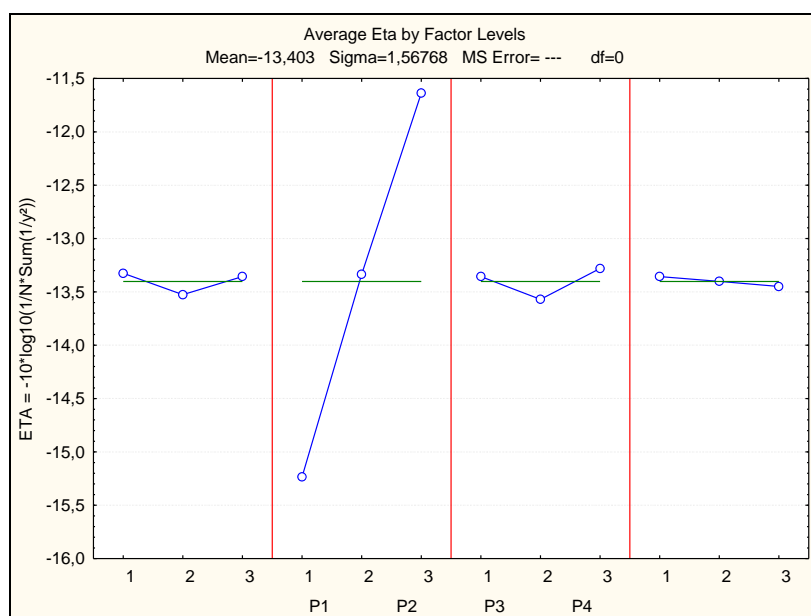


Figura 45 – Resultado gráfico para os diferentes factores – Intensidade de Almen

Posteriormente aplicou-se a análise de variância (ANOVA – Tabela 19) à razão sinal-ruído e ao declive da recta, de forma a validar e identificar os factores significativos e a sua relevância estatística.

De realçar o facto de que neste caso, a velocidade da turbina se sobrepõe a todos os outros, sendo o único com relevância estatística. Esta ocorrência deveu-se à má escolha dos níveis. No entanto pode-se concluir que caso seja necessário fazer algum ajuste à intensidade do processo, o parâmetro mais sensível é a velocidade das turbinas. Pelo que se recomenda que seja este o utilizado quando for necessário proceder a ajustes.

Tabela 19 – ANOVA Intensidade Almen

FV	SS	GI	MS	F0	P%
SS(GranalhaL)			0	0	
SS(GranalhaQ)			0	0	
SS(TurbinaL)	19,05079	1	19,05079	1087,095	98,51454
SS(TurbinaQ)			0	0	
SS(TapeteL)			0	0	
SS(TapeteQ)	0,164323	1	0,164323	9,376785	0,759819
SS(CaudalL)			0	0	
SS(CaudalQ)			0	0	
erro	0,105147	6	0,017524		0,725642
total	19,32026	8			100

4.2.2 Rugosidade

Ao nível da rugosidade impressa às molas de lâmina, e de forma análoga à intensidade, chegou-se à Figura 46. Identificou-se que o parâmetro que mais influencia a rugosidade é a velocidade de projecção da turbina (de forma linear), como seria de esperar o nível 1 (velocidade mais baixa) o nível ideal. No entanto identifica-se também que a dimensão da granalha influencia a rugosidade, sendo o nível 3 (granalha de dimensão menor) o ideal.

Tabela 20 - Resultados obtidos para a rugosidade para cada condição de ensaio

P1 %	P2 %	P3 %	P4 %	Rugosidade				
Granalha >0,8 mm	Velocidade da turbina	Velocidade do tapete	Caudal	1	2	3	S/N	Média
79,3	90	90	90	43,4	44,6	42,3	-32,75	43,43
79,3	100	100	100	45,9	47,2	43,8	-33,18	45,63
79,3	110	110	110	70	70	70	-36,90	70
76,6	90	100	110	36,9	34,7	34,5	-30,97	35,36
76,6	100	110	90	47,2	44,3	45,6	-33,20	45,70
76,6	110	90	100	70	70	70	-36,90	70
68,8	90	110	100	36,2	36,5	35,4	-31,13	36,03
68,8	100	90	110	48,4	49,2	46,1	-33,60	47,9
68,8	110	100	90	48,5	70	47,5	-35,00	55,33
							S/N	-33,74
							SST	37,60

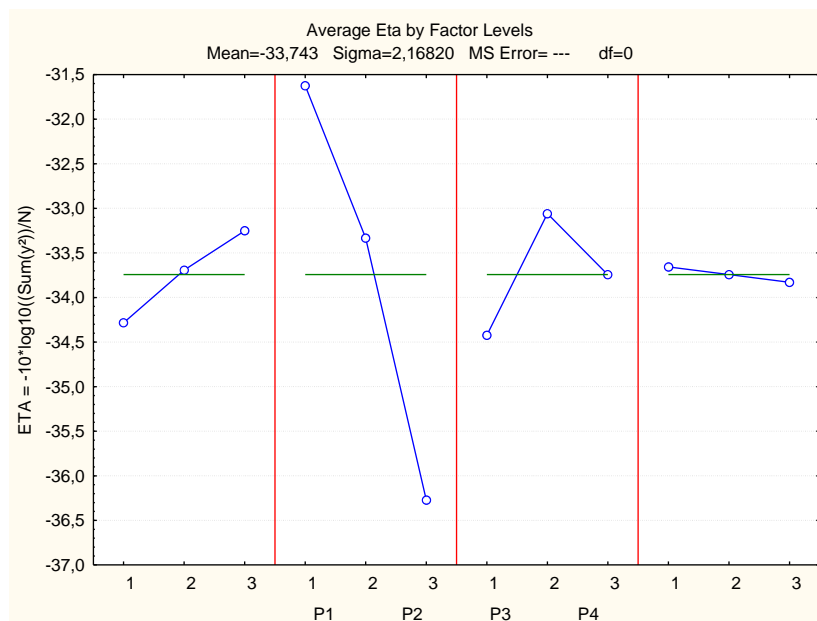


Figura 46 – Resultado gráfico para os diferentes factores - Rugosidade

No entanto de forma análoga à intensidade, quando se avaliam os resultados obtidos na análise de variância (ANOVA – Tabela 19) identifica-se que só a velocidade de projecção tem relevância estatística face aos outros parâmetros. Isto ocorre devido ao mesmo facto apresentado para a intensidade.

Tabela 21 – ANOVA Rugosidade

FV	SS	gl	MS	F0	P%
SS(GranalhaL)	1,597014	1	1,597014055	1380314	4,246393
SS(GranalhaQ)	0,011075	1	0,011075414	9572,586	0,029446
SS(TurbinaL)	32,40837	1	32,40836685	28010859	86,17254
SS(TurbinaQ)	0,752846	1	0,752845769	650691,8	2,001784
SS(TapeteL)	0,688451	1	0,688450606	595034,4	1,830559
SS(TapeteQ)	2,10617	1	2,106170145	1820383	5,600219
SS(CaudalL)	0,044768	1	0,044768015	38693,42	0,119033
SS(CaudalQ)			0	0	-3,1E-06
erro	1,16E-06	1	1,15699E-06		2,77E-05
total	37,60869	8			100

4.2.3 Saturação

Para a característica da qualidade Saturação, chegou-se à Figura 47 onde é possível identificar que o parâmetro que mais influencia o processo é o caudal de alimentação das turbinas sendo esta variação linear. Como seria de esperar o nível 3 é o óptimo (caudal maior), pois obtemos maior número de impactos para o mesmo tempo de exposição.

Seria expectável que a velocidade do tapete (tempo de exposição) apresentasse também relevância no entanto a mesma não ocorreu.

Tabela 22 - Resultados obtidos para a saturação para cada condição de ensaio

P1	P2	P3	P4	Saturação				
%	%	%	%					
Granalha >0,8 mm	Velocidade da turbina	Velocidade do tapete	Caudal	1	2	3	S/N	Média
79,3	90	90	90	25	26,6	26,6	-28,34	26,11
79,3	100	100	100	4,7	10,5	9,5	-18,75	8,27
79,3	110	110	110	8,69	4,54	4,54	-15,90	5,92
76,6	90	100	110	0,1	0,1	6,6	-11,70	2,28
76,6	100	110	90	23,51	25	33,33	-28,82	27,28
76,6	110	90	100	13,04	13,63	9,09	-21,65	11,92
68,8	90	110	100	0,1	7,69	0,1	-12,95	2,63
68,8	100	90	110	5,55	5,88	11,76	-18,32	7,73
68,8	110	100	90	16,66	17,39	22,72	-25,62	18,92
							S/N	-20,23
							SST	320,99

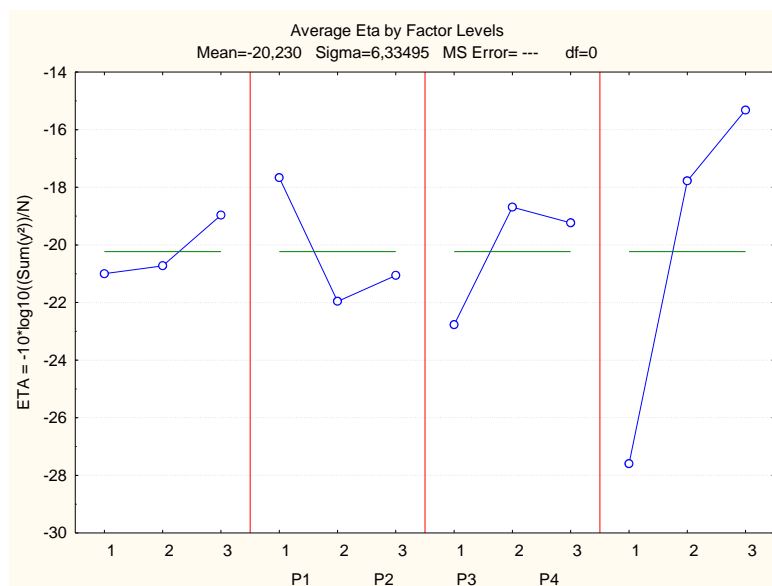


Figura 47 – Resultado gráfico para os diferentes factores - Saturação

Posteriormente aplicou-se a análise de variância (ANOVA – Tabela 23) na qual se identifica que mais uma vez apenas um dos parâmetros apresenta relevância estatística. Tal como para os restantes casos isto deveu-se a uma má escolha dos níveis seleccionados. Este erro

deveu-se ao facto de se ter optado por uma variação fixa de mais ou menos 10% face ao valor actualmente empregue. Pois não existia um conhecimento aprofundado acerca da sensibilidade de cada parâmetro.

Tabela 23 – ANOVA Saturação

FV	SS	gl	MS	F0	P%
SS(GranalhaL)			0	0	
SS(GranalhaQ)			0	0	
SS(TurbinaL)			0	0	
SS(TurbinaQ)			0	0	
SS(TapeteL)			0	0	
SS(TapeteQ)			0	0	
SS(CaudalL)	226,4111	1	226,4111413	16,75579	66,324
SS(CaudalQ)			0	0	
erro	94,58689	7	13,51241329		33,676
total	320,998	8			100

5 Conclusões e desenvolvimentos futuros

5.1 Conclusões

Deste trabalho foi possível concluir que a técnica de *shot peening* por granalhagem quando utilizada correctamente introduz tensões residuais de compressão que por sua vez resultam num aumento na vida à fadiga das molas de lâmina.

As tensões residuais de compressão à superfície, aumentam com o aumento da dureza do material, que aumenta por sua vez com o aumento da intensidade de Almen. No entanto, com intensidades mais altas ($> 1,2$ mm), existe maior descarburação devido ao aumento da temperatura, e detecta-se um aumento dos defeitos de superfície do tipo *overlap* que diminuem a vida à fadiga. O mesmo se concluiu para a tensão de compressão máxima.

A profundidade da camada em compressão aumenta com o tempo de exposição (maior caudal) e diminui com o aumento da dureza, sendo esta a característica que mais influenciou a vida à fadiga, isto é, quanto maior for a profundidade da camada em compressão maior é a vida à fadiga.

Verifica-se que para intensidades de Almen elevadas (acima do limite especificado) ocorre uma saturação do aumento da vida à fadiga, que existe um aumento da descarburação e dos defeitos de superfície (*overlap*). Deste modo pode-se concluir que não existe qualquer benefício em trabalhar com intensidades de Almen elevadas pois ocorre um aumento da probabilidade de falha, recomendando-se a necessidade de cumprir a especificação (0,6 a 0,9 mm) actualmente em uso na Empresa através da sensibilização dos operadores dos equipamentos para estas consequências.

Como tal existem dois mecanismos que influenciam a vida à fadiga em simultâneo e com efeitos opostos. Aumentando as tensões residuais de compressão na superfície aumenta-se a vida à fadiga enquanto que com o aumento da rugosidade e dos defeitos superficiais esta diminui.

Com a utilização do método de Taguchi esperava-se conseguir otimizar os factores controláveis do processo, assim como diminuir a sua variabilidade. No entanto, apenas se conseguiram identificar os factores que mais influenciam o processo para cada característica em análise. Observou-se que a intensidade de Almen e a rugosidade são influenciadas pela velocidade imposta às turbinas e que a saturação é influenciada pelo caudal de alimentação (mais caudal).

Conclui-se que a redução significativa da variabilidade do processo só é possível com um investimento em novos equipamentos (turbinas de nova geração e dispositivos de controlo

de caudal). Com os equipamentos existentes é possível aumentar a produtividade e reduzir os custos do processo, aumentando a velocidade do transportador e do caudal de alimentação e ainda diminuindo a velocidade das turbinas.

5.2 Desenvolvimentos futuros

Na sequência deste estudo recomenda-se uma análise estatística aprofundada do efeito dos principais parâmetros do processo de *shot peening* na intensidade de Almen que permitiria otimizar o processo em uso na Empresa com melhoria na qualidade do produto e com redução de custos de granalha, energia e produto rejeitado.

Bibliografia

- [1] LONGHURST C; “Suspension Bible”. 2013 [citado em Jan 2014] Disponível em: http://www.carbibles.com/suspension_bible_pg2.html
- [2] MHANNA, M.; SADEK, M.; SHAHROUR; I. “Numerical modeling of traffic induced ground vibration”. Computers and Geotechnics” pp. 116 – 126, 2012.
- [3] FRAUENTHAL AUTOMOTIVE; “Leaf Springs”. 2013 [citado em Jan 2014] Disponível em: <http://en.frauenthal-automotive.com/products/leaf-springs>
- [4] FROHN; “Shot blasting media”. 2013 [citado em Jan 2014] Disponível em: <http://www.frohn.com/en/products/high-performance-specialty-shot-blasting-media/>
- [5] BARBOSA, C; SOARES, V.; “Influência das tensões residuais no comportamento em fadiga e fractura de ligas metálicas”.1998
- [6] MOURA BRANCO C.; “Mecânica dos materiais” Fundação Calouste Gulbenkian. 1985.
- [7] FRAUENTHAL AUTOMOTIVE. “Tensões residuais”. 2012.
- [8] MIAO H.; LAROSE S.; PERRON C.; LEVESQUE M.; “An analytical approach to relate *shot peening* parameters to Almen intensity”, Surface & Coatings Technology. Elsevier Ltd; 2010, pp.2055-2066.
- [9] GILLESPIE, R.D.; “*Shot peening* media – Its effect on process consistency and resultant improvement in fatigue characteristics”. Premier Shot Company; 1990.
- [10] KERSCHING, U.; “New developments in cut wire shot for *shot peening*”. R+K Draht Gmbh 2010.
- [11] FLAVENOT, J.F.; “Influence of ageing of a cut steel wire shot during *shot peening*”. CETIM, 1990.
- [12] ALMEN, J.O.;BLACK, P.H.; “Residual stresses and fatigue in metals” MacGraw Hill, Book Company, 1963.
- [13] SAE. “SAE J443” 1990.
- [14] BHUVARAGHAN B, SRINIVASAN SM, MAFFEO B. “Optimization of the fatigue strength of materials due to *shot peening*” 2010;2(2):33–63.
- [15] PEREIRA, Z.L; REQUEIJO J.G. “Qualidade: Planeamento e controlo estatístico de processos”; FFCT, 2nd Edition.

- [16] SINGH L, KHAN RA, AGGARWAL ML. “Optimization of shot penning process for AISI 304 using grey relational analysis with Taguchi method ” 2013.
- [17] HAUKE, V. “Structural and residual stress analysis by nondestructive methods”. Elsevier, 1997.
- [18] FRANÇOIS, M. SPRAUEL, J.M. DÉHAN , C.F. “X-ray Diffraction Method”, Handbook of measurement of residual stresses. 1996.
- [19] MING-WEI, L; WANG, C. “Weibull data analysis with few or no failures”, Daimler Chrysler corporation.